

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра технічної кібернетики

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ І.Р. Пархомей  
(підпис)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»

на тему: Удосконалення системи отримання та обробки вхідної інформації

Виконав: студент другого курсу, групи ІК-82мп  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Недолужко Владислав Валентинович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ д.т.н., професор, Пархомей І.Р.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_ НК \_\_\_\_\_ к.т.н., доцент, Пасько В.П.  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_ викладач кафедри АУТС Міщенко В.О.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра технічної кібернетики

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 126 «Інформаційні системи та технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ І.Р. Пархомей  
(підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Недолужко Владиславу Валентиновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Удосконалення системи отримання та обробки вхідної інформації для робота

науковий керівник дисертації Пархомей Ігор Ростиславович, д.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «28» 10 2019 р. № 3770-с

2. Термін подання студентом дисертації 18.11.2019

3. Об'єкт дослідження Робототехнічна система

4. Предмет дослідження Процес управління роботизованою системою

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Аналіз існуючих систем

2. Аналіз характеристик радіоприймачів

3. Синтез алгоритму управління роботизованою системою

4. Пропозиції щодо апаратної реалізації системи на новітній елементній базі

5. Оцінка якісних та кількісних показників функціонування системи

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу 1. Блок схема алгоритму функціонування системи; 2. Структурна схема системи; 3. Функціональна схема системи; 4. Принципіальна схема системи; 5. Лістинг коду; 6. Графіки роботи системи.

7. Орієнтовний перелік публікацій Недолужко В.В. Алгоритм визначення Електромагнітної сумісності для рішення задач частотного планування //  
Адаптивні системи автоматичного управління

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
НК	Пасько В.П., доцент		
Перевірка на співпадіння	Лісовиченко О.І., доцент		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Формування проблематики	02.09.2019 – 08.09.2019	
2	Аналіз проблематики	09.09.2019 – 15.09.2019	
3	Постановка задачі	16.09.2019 – 22.09.2019	
4	Синтез алгоритму функціонування системи	23.09.2019 – 29.09.2019	
5	Пропозиції щодо апаратної реалізації системи	30.09.2019 – 06.10.2019	
6	Розробка ПЗ	07.10.2019 – 13.10.2019	
7	Тестування та покращення ПЗ	14.10.2019 – 20.10.2019	
8	Практичне застосування ПЗ	21.10.2019 – 27.10.2019	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Недолужко В.В.

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Пархомей І.Р..

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

## АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто проблему в області отримання та обробки вхідної інформації для робота, показано основні особливості існуючих рішень, їх переваги та недоліки.

При розпізнаванні сигналів на приймач потрапляють потрапляє зашумлений сигнал, який несе в собі непотрібну для обробки інформацію. Для його усунення використовуються методи цифрової обробки сигналів, за допомогою яких з вхідного сигналу виділяється корисний, що можна використовувати для подальшої обробки інформації.

Визначено завдання для системи отримання та обробки вхідної інформації, обрано найефективніший метод цифрової обробки та відібрано для вдосконалення систему, що найбільше підходить для вирішення поставленої задачі. У роботі описано структуру системи та проведено експерименти для оцінки її функціонування.

Синтезована система надає можливість зчитати та виділити корисну інформацію із зашумленого сигналу з мінімальними витратами часових та енергетичний ресурсів, що в свою чергу не впливає на точність обробки сигналу.

Ключові слова: цифрова обробка сигналів, шум, аналого-цифрове перетворення, аналоговий та цифровий фільтр, датчик.

Розмір пояснювальної записки – 95 аркушів, містить 18 ілюстрацій, 25 таблиць, 2 додатки.

## ABSTRACT

The work deals with the problem of obtaining and processing of input information for the robot, shows the main features of existing solutions, their advantages and disadvantages.

When recognizing signals to the receiver are hit by a noisy signal, which carries unnecessary information for processing. It eliminates the use of digital signal processing techniques, which provide a useful input that can be used for further processing of information.

The tasks for the system of receiving and processing of input information are defined, the most effective method of digital processing is selected and the system most suited for solving the task is selected for improvement. The structure of the system is described in the paper and experiments are performed to evaluate its functioning.

The synthesized system makes it possible to read and extract useful information from the noisy signal with minimal time and energy costs, which in turn does not affect the accuracy of signal processing.

Keywords: digital signal processing, noise, analog-to-digital conversion, analog and digital filter, sensor.

The size of the explanatory note is 95 sheets, contains 18 illustrations, 25 tables, 2 appendices.

Пояснювальна записка  
До магістерської дисертації

на тему: Удосконалення системи отримання та обробки вхідної  
інформації для робота

Київ – 2019 року

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ.....	6
1.1. Основні поняття про сигнал та перешкоди.....	6
1.2. Огляд існуючих аналогів.....	12
1.3. Недоліки системи обробки сигналів.....	19
1.4. Постановка задачі.....	20
Висновки до розділу.....	20
РОЗДІЛ 2. АЛГОРИТМ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛУ .....	21
2.1. Огляд основних характеристик радіоприймачів.....	21
2.2. Аналого-цифрове перетворення сигналів.....	34
2.3. Аналіз характеристик цифрових та аналогових фільтрів.....	46
2.4. Синтез алгоритму обробки вхідної інформації.....	56
Висновки до розділу.....	58
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИНТЕЗОВАНОЇ СИСТЕМИ.....	59
3.1. Оптимізація програмного забезпечення синтезованої системи.....	59
3.2. Пропозиції щодо технічної реалізації синтезованої системи на новітній елементній базі.....	61
3.3. Оцінка ефективності синтезованої системи обробки вхідної інформації.....	70
Висновки до розділу.....	74
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	75
4.1. Опис ідеї проекту.....	75
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	77
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	85
4.5. Розроблення маркетингової програми.....	88
Висновки до розділу.....	91
ВИСНОВОК.....	92
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	94

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

DSP (digital signal processing) – цифрова обробка сигналів

LWDF (lightweight dataflow) – легкий метод потоку даних

CFDF (computational fluid dataflow) – функціональний потік даних

API (application program interface) – інтерфейс прикладного програмування

АЦП – аналого-цифрове перетворення

SQNR (signal to quantization noise ratio) – співвідношення сигнал-квантування-шум

DNN (deep neuro network) – глибинна нейронна мережа



## ВСТУП

Багато аспектів електротехнічної та електронної техніки зводилися до застосування методів програмування для обробки цифрових сигналів. У "старі часи" інженер-електрик, який використовується для виведення паяльника і «виготовлення речей», наприклад транзистор схеми та пізніші інтегральні схеми з використанням функціональної електроніки. Причому багато цих систем базувались на аналоговій технології. В даний час велика частина роботи інженерів-електриків заснована на обробці інформації у вигляді цифрових сигналів використовуючи все більш потужні процесори та все більш спеціалізоване обладнання DSP, що більше найчастіше це просто потужні прискорювачі з плаваючою комою для спеціалістів з обробки програмне забезпечення.

Конструкція будь-якої електронної системи з точки зору обладнання, яке виконується це і програмне забезпечення, яке "приводить в дію", нерозривно пов'язане з імітацією система. Дійсно, хоча жаргон і звукові укуси кардинально змінюються від одного науково-технічна дисципліна до іншого, використання математичного моделювання комп'ютерне моделювання набуло великого значення в промисловості. Для цього існують чудові комп'ютерні пакети, якими інженери користуються звичайно дизайн та розробка. Зараз у інженера-електрика та електроніки дуже багато складні тренажери для проектування цифрових сигнальних процесорів, які потім можуть бути використані програмувати відповідний чіп безпосередньо.

Цифрова обробка сигналів (DSP) широко використовується в багатьох типах пристроїв, включаючи мобільні телефони, планшети, персональні комп'ютери та численні форми вбудованих систем. Впровадження сучасних додатків DSP частково є складним завданням через складні дизайнерські простори. Ці дизайнерські простори передбачають безліч видів настроюваних параметрів, пов'язаних з алгоритмами обробки сигналів, які

використовуються, а також різні способи відображення алгоритмів на цільових платформах.

Протягом дипломної роботи ми розробляємо проектні методології та інструменти для інтеграції нових компактних моделей системного рівня та методів розробки з легкими методами потоку даних (LWDF) для проектування та впровадження систем обробки сигналів. LWDF – це раніше запроваджений підхід для інтеграції нових форм дослідження простору, дизайну та оптимізації рівня системи в процесі проектування систем DSP. LWDF пропонує компактний набір інтерфейсів прикладного програмування (API), що підлягають повторному зарядженню, що полегшує інтеграцію моделей та методів на основі потоку даних. Потік даних є важливою формальною основою для розширеного проектування системи DSP, а гнучка підтримка потоку даних в LWDF полегшує експерименти з та застосування нових методів проектування, заснованих на концепціях потоку даних. Наші розроблені методології застосовують програмування LWDF для полегшення їх застосування на різних типах платформ та їх ефективної інтеграції з платформою на основі інструментів для апаратного та програмного забезпечення. Крім того, ми впроваджуємо нові розширення до LWDF, щоб покращити його корисність для цифрового дизайну обладнання та впровадження адаптивного оброблення сигналу.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

### 1.1. Основні поняття про сигнал та перешкоди

Сигнал – це функція, яка передає інформацію про явище. В електроніці та телекомунікаціях мається на увазі будь-яка зміна напруги, струму або електромагнітної хвилі, яка несе інформацію. Сигнал також може бути визначений як помітна зміна кількості.

Будь-яка фізична величина, що демонструє зміни в просторі чи часі, може бути сигналом, який використовується, серед інших можливостей, для обміну повідомленнями між спостерігачами. Відповідно до транзакцій IEEE з обробки сигналів, сигналом може бути аудіо, відео, мовлення, зображення, пов'язані з сонаром та радіолокацією тощо.

Теорія інформації служить формальним вивченням сигналів та їх змісту, а інформація сигналу часто супроводжується шумом. Шум – це загальний термін для небажаних (або взагалі невідомих) модифікацій, яких може зазнавати сигнал під час захоплення, зберігання, передачі, обробки або перетворення. Завади можна класифікувати за джерелом походження, за характером впливу на сигнал, за періодичністю, за видом математичного опису тощо.

За джерелом походження шуми поділяються на внутрішні та зовнішні.

- Внутрішні завади можуть виникати у пристроях отримання та обробки сигналів за рахунок певних дестабілізуючих факторів, або в наслідок природи сигналу.
- Зовнішні завади навпаки з'являються за рахунок перешкод навколишнього середовища.

За типом впливу на сигнал завади поділяються на адитивні та мультиплікативні.

- Адитивний шум – незалежна величина, що накладається на корисний сигнал, та не впливає на його інформаційну складову.
- Мультиплікативні завади виникають згідно специфіки сигналу та деформують його значення. Корисний сигнал може бути відтворений тільки за визначеного характеру мультиплікативних завад.

За періодичністю завади бувають флуктуаційні, імпульсові та періодичні.

- Флуктуаційні завади – це неврегульований набір шумів довільних амплітуд і частот.
- Імпульсові завади можуть бути як одинарними так і періодичними імпульсами випадкової величини.
- Періодичні завади ж виникають у наслідок періодичних перешкод.

Сигнали ж по своїй природі можуть мати безліч варіацій в залежності від природи походження, фізичних властивостей, тощо. Проте в обробці сигналів прийнято працювати безпосередньо з математичною моделлю сигналу. Математична модель створюється внаслідок формування функціональної залежності певного параметру сигналу від незалежного аргументу. Тільки завдяки цьому можна знехтувати певними характеристиками сигналу та проводити аналіз, обробку, перетворення його інформаційно-важливих складових.

Способи формування математичних моделей сигналів можна поділити на два основні типи:

- Детерміновані сигнали – це періодичні сигнали значення яких в довільний момент часу може бути обчислене.
- Випадкові сигнали – в свою чергу мають випадковий характер зміни значень, для визначення яких застосовуються закони розподілу ймовірностей, спектральний аналіз, тощо.

Окрім динамічного математичного опису, що базується на залежності значень сигналу від часу, можна подавати сигнал, спираючись на обернену величину, тобто за частотою. Такий вид математичної моделі називається частотним спектром сигналу.

В залежності від способу математичного опису сигналу можна поділити на наступні:

- Аналоговий сигнал – сигнал даних, у якого кожен з представлених параметрів описується безперервною функцією часу і безперервною безліччю можливих значень. Наприклад, в аналоговому аудіосигналі миттєва напруга сигналу постійно змінюється залежно від тиску звукових хвиль.
- Дискретний сигнал на відмінну від аналогового має скінченну кількість значень, що може набувати безперервна функція.
- Цифровий сигнал – це представлення фізичного сигналу, який є дискретним за часом і амплітудою та квантовим за своїм значення. Значення сигналу існує лише через регулярні інтервали часу, оскільки лише значення відповідного фізичного сигналу в ці вибіркові моменти є важливими для подальшої цифрової обробки. Сам процес перетворення нескінченної кількості дискретних значень аналогового сигналу в скінченну множину цифрових значень називається квантуванням за рівнем. Помилки, що виникають у цьому процесі називаються шумом або помилкою квантування.

*Радіохвилі* – це тип електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі в електромагнітному спектрі, що перевищує інфрачервоне світло. Радіохвилі мають частоту від 300 гігагерц (ГГц) до 30 герц (Гц). При 300 ГГц відповідна довжина хвилі – 1 мм, а при 30 Гц – 10 000 км. Як і всі інші електромагнітні хвилі, радіохвилі рухаються зі швидкістю світла у вакуумі. Вони породжуються електричними зарядами, що зазнають прискорення,

наприклад, електричними струмами, що змінюються з часом. Природні радіохвилі випромінюються блискавками та астрономічними об'єктами.

Радіохвилі генеруються штучно передавачами і приймаються радіоприймачами, використовуючи антени. Радіохвилі дуже широко використовуються в сучасних технологіях для стаціонарного та мобільного радіозв'язку, радіомовлення, радіолокаційних та радіонавігаційних систем, супутників зв'язку, бездротових комп'ютерних мереж та багатьох інших програм. Різні частоти радіохвиль мають різні характеристики поширення в атмосфері Землі; довгі хвилі можуть розсіюватись навколо перешкод, як гори, і слідувати контуром землі (наземні хвилі), більш короткі хвилі можуть відбиватися від іоносфери і повертатися на землю за горизонт (небесні хвилі), в той час як набагато коротші довжини хвиль згинаються або розсіюються дуже мало і рухаються далі лінією зору, тому відстані їх поширення обмежені зоровим горизонтом.

Радіоспектр поділяється на ряд радіочастот на основі частоти, призначеної для різних цілей.

Радіохвилі випромінюються електричними зарядами при їх прискоренні. Вони виробляються штучно електричними струмами, що змінюються за часом, та складаються з електронів, що протікають туди-сюди в спеціально сформованому металевому провіднику, який називається антеною. Електронний пристрій під назвою радіопередавач подає на антену коливальний електричний струм, а антена випромінює потужність як у радіохвилі. Їх отримує інша антена, приєднана до радіоприймача. Під час удару по приймальній антені радіохвилі штовхають електрони в металі вперед і назад, створюючи крихітні коливальні струми, які виявляються приймачем.

Радіохвилі у вакуумі рухаються зі швидкістю світла. При проходженні через матеріальне середовище вони сповільнюються відповідно до діелектричної проникності та проникності цього об'єкта. Повітря досить

тонке, тому в атмосфері Землі радіохвилі рухаються наближено до швидкості світла.

Довжина хвилі – це відстань від одного піку електричного поля хвилі до наступного і обернено пропорційна частоті хвилі. Відстань, яку радіохвиля проходить за одну секунду у вакуумі, становить 299,792,458 метрів, що є довжиною хвилі радіосигналу в 1 герц. Радіосигнал на 1 мегагерц має довжину хвилі 299,8 метрів.

Вивчення радіорозповсюдження (як радіохвилі розповсюджуються у вільному просторі та над поверхневою Землею) доводиться проводити при дії практичних радіосистем. Радіохвилі, що проходять через різні об'єкти, проявляють відбиття, занесення, поляризацію, дифракцію та поглинання. Практичні радіосистеми в основному застосовують три різні методи поширення радіохвиль:

*Лінія зору:* стосується радіохвиль, що розповсюджуються прямолінійно від передавальної антени до приймальної антени. Цей метод не обов'язково потребує чистої лінії спостереження. На низьких частотах радіохвилі можуть проходити через будівлі та інші перешкоди. Це єдиний метод поширення, що може бути на частоті 30 МГц. На земній поверхні, розповсюдження радіосигналів лінією зору обмежене зоровим горизонтом на відстань 64 км. Цей метод застосовується у мобільних телефонах, FM, телевізійних трансляціях та радіолокаторах. Використовуючи параболічні антени для передачі мікрохвильових променів, "точкові" мікрохвильові ретранслятори передають телефонні та телевізійні сигнали на великі дистанції до зорового горизонту. Наземні станції можуть з'єднатись зі супутниками та космічними кораблями у мільйонних кілометрів від Землі.

- *Непряме поширення:* радіохвилі можуть діставати точки за межею зору, за допомогою дифракції та рефлексії. Дифракція дозволяє радіохвилі огинати перешкоди, такі як кут будівлі, транспортні засоби або поворот у залі. Радіохвилі також частково відбиваються від поверхонь, таких як стіни, підлога, стеля,

транспортні засоби та земля. Ці методи поширення трапляються у системах радіозв'язку короткого діапазону, таких як мобільні телефони, переносні та бездротові станції. Недоліком цього методу є багатопарове поширення, при якому радіохвилі рухаються від передавальної до довільної антени декількома шляхами. Такі хвилі накладаються, часто створюючи замикання та інші проблеми з прийомом.

*Наземні хвилі:* на низьких частотах, нижчих за 2 МГц, в середніх і довгих діапазонах довжини хвиль, відповідно до вертикально-поляризованої дифракції, радіохвилі можуть огинати такі об'єкти як пагорби і гори та поширюватися за горизонт, поширюючись як поверхневі хвилі, що рухаються по контуру Землі. Це дозволяє передавальним станціям середньої та довгої довжини мати зону покриття за межею горизонту, тобто на сотні кілометрів. З падінням частоти втрати зменшуються, а досяжний діапазон збільшується. Військові системи комунікації дуже низьких частот (VLF) і екстремально-низьких частот (ELF), можуть зв'язатися з більшістю Землі та з підводними човнами на будь-якій глибині

*"Небесні" хвилі:* при середніх та довгих довжинах, хвилі відбиваються від провідних шарів заряджених частин (іонів) в частині атмосфери, що називається іоносферою. Тож радіохвилі, направлені під кутом до горизонту, можуть повернутися на Землю за горизонтом; це називається пропускну, або "небесним" поширенням. Використовуючи мульти пропускну систему зв'язку, можна досягти міжконтинентального зв'язку. "Небесне" поширення варіативне і залежить від стану атмосфери. Воно є більш надійним вночі та взимку. Таке поширення широко використовували в першій половині XX століття, проте через його ненадійність "небесне" поширення майже не використовують.



## 1.2. Огляд існуючих аналогів

За останні роки досліджено багато методів проектування систем DSP на основі потоку даних для підтримки різних аспектів проектування та впровадження, включаючи моделювання та моделювання; планування та відображення дійових осіб на неоднорідні платформи; і управління буфером. Модельний дизайн широко вивчався та застосовувався впродовж багатьох років у багатьох областях вбудованої обробки. Потік даних добре відомий як парадигма для модельного дизайну, ефективного для вбудованих цифрових систем обробки сигналів (DSP). У моделюванні на основі потоку даних програми обробки сигналів представлені у вигляді спрямованих графіків (графіків потоку даних), а обчислювальні функції моделюються у цих графіках як вершини (дійові особи). Актори обмінюються пакетами даних (жетонами) за допомогою односпрямованих каналів зв'язку FIFO (first in – first out), які відповідають краям графіка потоку даних. За останні роки досліджено багато методів проектування систем DSP на основі потоку даних для підтримки різних аспектів проектування та впровадження, включаючи моделювання та моделювання; планування та відображення дійових осіб на неоднорідні платформи; і управління буфером.

Різноманітність масштабів проектування та потоків даних, що мають відношення до систем обробки сигналів, ставить перед собою великі труднощі для досягнення повного потенціалу, який пропонують платформи обробки сигналів при суворих обмеженнях часу на ринок. Хоча автоматизовані методи, такі як зазначені вище для планування та буферного відображення, ефективні для спеціалізованих комбінацій платформ і моделей потоку даних (наприклад, багатоядерні процесори та синхронний потік даних відповідно), вони обмежені у своїй здатності підтримувати більш всебічну оцінку дизайн-простір, де самі моделі та цільові платформи мають великий вплив на вирішення обмежень щодо впровадження та цілей оптимізації. Тому дизайнери систем повинні вдаватися до спеціальних методів для дослідження

альтернатив дизайну, що охоплюють декілька масштабів реалізації, типів платформ або методів моделювання потоку даних.

Для прикладу розглянемо методологію проектування та інтегрований набір інструментів і бібліотек, розроблених для усунення цього розриву. Ця методологія називається методологією STMC або STMCM, яка названа на честь різних установ, через які вона розвинена (Sassari, Tampere, Maryland, Cagliari). STMCM зосереджується на наданні експериментальних експериментів на різних рівнях абстрагування протягом всього процесу проектування, а також дозволяє дизайнерам продуктивно експериментувати і швидко ітерувати складні комбінації варіантів проектування, включаючи моделі потоку даних, неоднорідні цільові платформи та інтеграцію з певними мовами платформи та бек-ендом інструменти. Особливий акцент робиться на наданні ефективних експериментів із компромісними розробками обладнання та програмного забезпечення, а також компромісів, що передбачають продуктивність, використання ресурсів та енергоспоживання. Це компроміси, які особливо важливі та складні, щоб ефективно орієнтуватися в процесах проектування для впровадження системи на основі мікросхем сигнальних процесових систем.

Корисність STMCM полегшується за рахунок використання легкого програмування потоку даних (LWDF) та його основної моделі обчислення функціонального потоку даних (CFDF). LWDF пропонує компактний набір інтерфейсів прикладного програмування (API), що дозволяє відносно легко та ефективно застосовувати орієнтовані на обробку сигналів методи обробки даних в контексті існуючих процесів проектування, цільових платформ та мов, орієнтованих на моделювання та платформу, такі як MATLAB, C, CUDA та VHDL. Крім того, CFDF є загальною формою потоку даних, яка вміщує більш спеціалізовані форми потоку даних, такі як булевий потік даних, циклостатичний потік даних, синхронний потік даних та RVC-CAL. Таке розміщення різних моделей потоків даних, в свою чергу, надає потенціал для інтеграції конструкцій з іншими структурами потоку даних та бібліотеками

DSP. Крім того, LWDF є деталізацією-агностиком, в тому сенсі, що складність актора не обмежує застосованість рамки.

Щоб продемонструвати можливості STMCM у вирішенні проблем відображення практичних структур на основі потоку даних на платформах обробки неоднорідних сигналів, досліджено різні реалізації глибокої нейронної мережі (DNN) для класифікації транспортних засобів на гетерогенну вбудовану систему на мікросхемі (SoC), Xilinx Zynq Z-7020 SoC. Програми DNN створюють великі проблеми при їх розгортанні на вбудованих пристроях. Дослідження впровадження DNN на вбудованих пристроях SoC є складним завданням через обмежені ресурси для обробки та зберігання в цих пристроях і, особливо, через високу обчислювальну складність DNN. Вони передбачають дуже великі та складні структури сигнальних потоків, які передбачають інтенсивні обчислення, обмін даними та багатошарову обробку. Ці характеристики роблять вбудовану реалізацію DNN дуже актуальною як приклад для STMCM.

Методологія STMCM проілюстрована в додатку 1. Як вже визначено, STMCM – це проектна методологія, яка наголошує на концепціях LWDF, і спеціалізується на системах обробки сигналів на основі SoC. У верхній частині представляє специфічний для алгоритмічних та алгоритмічних аспектів, в той час як нижня частина є загальною частиною методології, яка може бути повторно використана для різних застосувань. Конкретно проілюстровано верхню частину в контексті проекту DNN; ця частина може бути замінена іншими аспектами дизайну на рівні додатків / алгоритмів при застосуванні STMCM до інших програм.

У STMCM ми застосовуємо модель програмування LWDF через полегшене середовище потоку даних (LIDE). LIDE - програмний інструмент для проектування та впровадження систем обробки сигналів на основі потоку даних. LIDE заснований на компактному наборі інтерфейсів прикладного програмування (API), який використовується для інстанціфікації, підключення та виконання дійових осіб потоку даних. Ці API реалізовані на

різних мовах реалізації. Наприклад, LIDE-C та LIDE-V забезпечують реалізацію мов C та Verilog LIDE API відповідно.

Як проілюстровано на додатку 1, основний функціональний потік даних (CFDF) – це форма потоку даних, на якій базується LWDF. У CFDF кожен актор визначається як набір режимів. Кожна стрілянина діє за одним із заданих режимів (називається "поточний режим", пов'язаним із стрільбою) та визначає наступний унікальний режим, який буде поточним режимом наступної стрільби. Норми виробництва та споживання (потоки даних) для портів актора постійні для даного режиму. Однак різні режими одного і того ж актора можуть мати різну швидкість, що дозволяє акторам проявляти динамічну поведінку потоку даних. Ми представляємо учасника комутаторів як приклад актора CFDF. Актор перемикача має три режими: Control, True та False. У режимі управління актор комутатора споживає один маркер з порту управління. У режимі True або False, актор комутатора споживає один маркер з порту даних і передає цей маркер на True або False Output порт відповідно. Таблиця потоків даних та схема переходу режимів між режимами CFDF актора перемикача проілюстровані на рис.1.1.

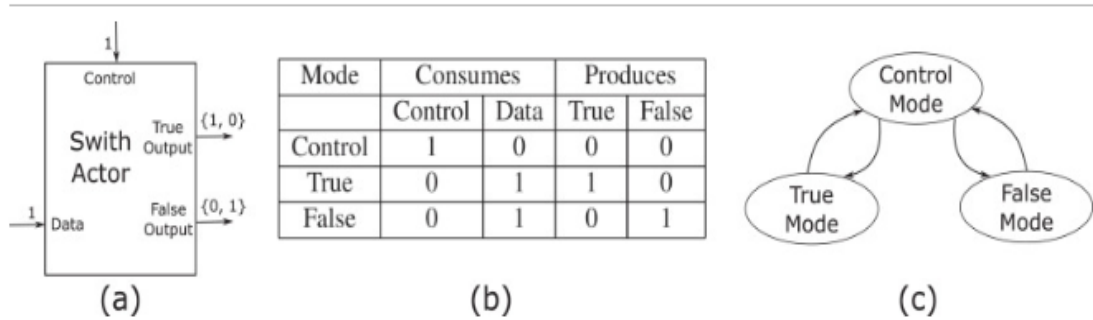


Рисунок 1.1. Перемикач в CFDF

Визначення перемикача CFDF включає дві функції, які називаються функцією включення та викликають функцію перемикача. Функція включення перевіряє, чи є достатньо даних, доступних на вхідних гранях актора, і достатньо порожнього місця на краях виходу, щоб звільнити актора в наступному режимі. Функція виклику виконує зйомку актора відповідно до поточного режиму актора, споживаючи та створюючи кількість даних, які

визначаються фіксованими швидкостями потоку даних у поточному режимі. Функція виклику також визначає наступний режим актора, як описано вище.

Інструменти, характерні для застосування, та пов'язані з ними процеси проектування проілюстровані сірими блоками в додатку 1. В цьому документі прийнято додаток DNN як конкретну демонстрацію того, як такі аспекти, що стосуються конкретного додатку, використовуються як невід'ємна частина STMCM. Процес проектування, орієнтований на DNN, проілюстрований на рис. 1, починається з виведення гіперпараметрів DNN та конфігурації мережі. Потім параметри, пов'язані з похідною структурою DNN, витягуються і алгоритм DNN ретельно перевіряється, щоб забезпечити задоволення цільових рівнів точності.

Блок, позначений «Вимоги та обмеження дизайну», стосується вимог та обмежень щодо застосування та платформи щодо впровадження DNN. Приклади цього включають вимоги щодо точності та пропускної здатності для систем класифікації DNN класифікації зображень та обмеження доступних енергетичних та апаратних ресурсів для цільової платформи SoC.

#### *Процес, пов'язаний з програмним забезпеченням*

На наступному основному етапі запропонованої методології проектування конфігурація мережі DNN, отримана за допомогою інструментів, орієнтованих на додаток, алгоритму, відображається до програмного забезпечення за допомогою LIDE-C. Зауважте, що LIDE-C жодним чином не обмежується системами DNN, а натомість призначений для підтримки широкого класу систем обробки сигналів та інформації на основі потоку даних. Дослідження простору проектування цифрової системи предистортування для бездротового зв'язку базується на впровадженні за допомогою LIDE-C. У деяких реалізаціях LIDE-C розширений для підтримки параметризованого моделювання синхронного потоку даних та застосовується для реалізації адаптивного приймача бездротового зв'язку. Також для оптимізації пропускної здатності застосовуються оптимізовані методи векторизації для дійових осіб на основі LIDE та демонструються за

допомогою приймача ортогонального поділу частоти мультиплексування (OFDM).

Працюючи з реалізацією DNN LIDE-C, ряд оптимізаційних процесів проводиться повторно, щоб упорядкувати реалізацію програмного забезпечення з точки зору відповідних цілей та обмежень проектування. Цей ітеративний процес оптимізації проілюстрований додатку 1. циклічним шляхом, що включає блоки, позначені представленням потоку даних, реалізацією LIDE-C та оптимізованою реалізацією LIDE-C. Запропонований підхід підтримує ефективне застосування широко використовуваних методів оптимізації програмного забезпечення DNN, таких як плитка для циклу та обмін пам'ятними буферами між краями графіка потоку даних.

Далі проводиться профілювання програмного забезпечення на оптимізованій LIDE-C системі DNN для вилучення даних профілювання. Ці дані витягуються для кожного компонента потоку даних архітектури DNN. У процесі профілювання, застосованого в STMCM, вимірюються розміри пам'яті буферів та час виконання акторів графіка. За характеристиками архітектури DNN система DNN поділяється на кілька обчислювальних шарів. У застосуванні STMCM програмне забезпечення програмного забезпечення спеціалізується на впровадженні DNN шляхом вимірювання загальних розмірів пам'яті для буферів як усередині кожного шару, так і між парами сусідніх шарів. Також вимірюється загальну часову складність кожного шару DNN.

#### *Процес, пов'язаний з обладнанням*

Модель потоку даних підграфа для прискорення реалізована в апаратному застосуванні за допомогою LIDE-V. Профілювання обладнання на основі конкретної платформи реалізації виконується на впровадженні LIDE-V. Це профілювання використовується для збору вимірювань продуктивності обладнання та для визначення можливих оптимізацій. Як і реалізація програмного забезпечення, реалізація апаратури, як правило, пройде через кілька ітерацій оптимізації до її завершення.

У LIDE-V апаратна реалізація актора потоку даних розкладається на реалізацію його функції включення та виклику функції. Ці компоненти реалізовані у вигляді двох зв'язаних модулів Verilog – модуля активації актора (AEM) та модуля виклику актора (AIM). Краї потоку даних реалізуються як модулі крайових потоків даних (DEM); ми неофіційно називаємо DEM також «FIFO».

Для забезпечення повного розподілу планування акторів можна підключити модуль планування акторів LIDE-V (ASM) до кожного актора. ASM ініціює нову стрільбу асоційованого актора будь-коли, коли актор вже не перебуває в режимі стрільби, має достатньо даних про вхідні кромки та має достатньо порожнього місця на його вихідних краях. Планування дій суб'єктів LIDE-V не обмежується таким повною мірою розподіленням підходом до планування. Наприклад, за допомогою відповідно розробленої логіки управління підмножини акторів можуть бути серіалізовані, щоб дозволити спільний доступ до ресурсів у межах підмножини. Однак у цій роботі ми обмежуємо нашу увагу повністю розподіленням плануванням. Повністю розподілене планування графіків потоків даних проаналізовано в різних контекстах. Наприклад, Ghamarian розробили методи аналізу пропускну здатності графіків синхронного потоку даних, які плануються повністю розподіленням способом. Такі методи аналізу можуть бути застосовані до апаратних підсистем в STMCM.

Ортогональність (розділення проблем) між актором, краєм та дизайном планувальників у LIDE-V покладає цінну основу для жорсткої інтеграції управління живленням у відповідних API. Зокрема, методи асинхронного проектування, глобально-асинхронний локально-синхронний дизайн (GALS) та лічильникові стрічки можуть ефективно застосовуватися за рахунок природних розширень API LIDE-V.

Для управління складністю та покращення повторного використання підсистем у межах та між проектами, можна інкапсулювати підграфи в LIDE-V в межах ієрархічних суб'єктів (НА). НА в LIDE-V з'являється ззовні

як звичайний (неієрархічний) LIDE-V актор з пов'язаними АЕМ, АІМ та АSM. Виконання НА як діючої особи у графі, що додається, координується зовнішнім планувальником, пов'язаним з НА. Коли ВП звільняється від його зовнішнього планувальника, внутрішній планувальник ВА координує стрілянину дійових осіб, які інкапсульовані всередині НА (вкладених акторів). Внутрішній планувальник виконує набір вкладених стрільб актора, які повинні бути завершені для даної стрільби НА.

### 1.3. Недоліки системи обробки сигналів

Якість систем обробки сигналів, таких як програмно визначене радіо або модем зв'язку, залежить від продуктивності обраної апаратної платформи. Ранні розробки дизайну дозволяють дизайнеру отримати уявлення про проблеми впровадження, архітектурні рішення для підвищення продуктивності та потужності, а також апаратне / програмне розділення до появи рівня реєстрації-передачі (RTL) та програмного забезпечення.

Крім того, ранні розробки дизайну допомагають архітектурним дизайнерським рішенням, що полегшують планування сучасних та майбутніх вимог. Дизайнери можуть далі розширити розробки конструкцій для проведення аналізу несправностей та виявлення тестових випадків для перевірки.

Більшість складних систем, таких як просунуті високошвидкісні платформи обробки сигналу, проходять через дорогі дизайнерські ітерації. Понад 70% ітерацій часу обумовлено неправильними дизайнерськими рішеннями або непорозумінням вимог. Крім того, на такі складні системи впливають численні фактори. Деякі з них – це низька затримка обробки, мала потужність, конфігурація та обмеження ресурсів. Ранні розробки дизайну допомагають подолати подібні проблеми.



#### 1.4. Постановка задачі

Провівши аналіз існуючих систем цифрової обробки сигналів, поставлено наступні завдання для розробки:

- Проаналізувати характеристики можливих радіоприймачів.
- Ознайомитися з методикою аналого-цифрового перетворення.
- Провести порівняльну характеристику аналогових та цифрових фільтрів.
- Синтезувати алгоритм управління роботизованою системою цифрової фільтрації сигналу.
- Програмна реалізація синтезованої системи.
- Розглянути варіанти апаратної реалізації системи на новітній елементній базі.
- Провести оцінку якісних та кількісних показників функціонування роботизованої системи

#### Висновки до розділу

У даному розділі проведено ознайомлення з поняттям сигнал та основними особливостями радіосигналів, проведено аналіз існуючих аналогів систем цифрової обробки сигналів у ході якого, на основі порівняльної характеристики методу STMC та методу полегшених графіків передачі даних, виявлено головні недоліки функціонування та встановлено задачі для синтезу та оптимізації системи цифрової фільтрації сигналу, опираючись на вже існуючі методи.

## РОЗДІЛ 2. АЛГОРИТМ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ВХІДНОГО СИГНАЛУ

### 2.1. Огляд основних характеристик радіоприймачів

У радіозв'язку радіоприймач – це електронний пристрій, який приймає радіохвилі та перетворює інформацію, яку вони переносять, у зручну форму. Він використовується з антеною. Антена перехоплює радіохвилі (електромагнітні хвилі) і перетворює їх у крихітні змінні струми, які подаються на приймач, і приймач вилучає потрібну інформацію. Приймач використовує електронні фільтри для відділення потрібного радіочастотного сигналу від усіх інших сигналів, підхоплених антеною, електронним підсилювачем для збільшення потужності сигналу для подальшої обробки і, нарешті, відновлює потрібну інформацію шляхом демодуляції.

Радіоприймачі є важливими компонентами всіх систем, що використовують радіо. Інформація, отримана приймачем, може бути у формі звуку, рухомих зображень (телебачення) або даних. Радіоприймач може бути окремим елементом електронного обладнання або електронною схемою всередині іншого пристрою.

У аналогових системах радіомовлення використовуються два типи модуляції: АМ та FM. *Модуляція* – це процес додавання інформації до хвилі радіоносія.

При амплітудній модуляції (АМ) сила радіосигналу змінюється звуковим сигналом. Трансляція АМ дозволена в діапазонах радіопередач АМ, які мають між 148 і 283 кГц в довгохвильовому діапазоні, і між 526 і 1706 кГц в діапазоні середньої частоти (MF) радіочастотного спектру. Мовлення АМ також дозволено в короткохвильових діапазонах між приблизно 2,3 та 26 МГц, які використовуються для міжнародного мовлення на великі відстані.

У частотній модуляції (FM) частота радіосигналу незначно змінюється звуковим сигналом. FM-мовлення дозволено в діапазонах радіомовлення FM

між 65 і 108 МГц в діапазоні дуже високих частот (УКХ). Точні діапазони частот дещо відрізняються в різних країнах.

Цифрове аудіомовлення (DAB) – це передова радіотехніка, яка дебютувала в деяких країнах у 1998 році, яка передає аудіо з наземних радіостанцій як цифровий сигнал, а не аналоговий сигнал, як це роблять АМ та FM. Його переваги полягають у тому, що DAB має більший імунітет до радіошуму та перешкод, що дозволяє краще використовувати обмежену пропускну здатність радіочастотного спектру та забезпечує розширені функції користувача. Його недолік полягає в тому, що він несумісний з попередніми радіоприймачами, тому потрібно купувати новий DAB-приймач. Станом на 2018 рік 38 країн пропонують DAB з 2100 станціями, що обслуговують зони прослуховування, що містять 420 мільйонів людей.

Радіостанції DAB працюють по-різному, ніж станції АМ або FM: одна DAB-станція передає широкий смугу пропускання 1500 кГц, яка несе від 9 до 12 каналів, з яких слухач може вибрати. Мовники можуть передавати канал із діапазоном різної швидкості передачі бітів, тому різні канали можуть мати різну якість звуку. У різних країнах станції DAB транслюються в діапазоні III (174–240 МГц) або L діапазоні (1.452–1.492 ГГц).

Сила сигналу радіохвиль зменшується, чим далі вони рухаються від передавача, тому радіостанцію можна приймати лише в обмеженому діапазоні свого передавача. Діапазон залежить від потужності передавача, чутливості приймача, атмосферного та внутрішнього шуму, а також будь-яких географічних перешкод, таких як пагорби між передавачем та приймачем. Радіохвилі радіовипромінювання АМ рухаються як наземні хвилі, які йдуть по контуру Землі, тому радіостанції АМ можна надійно приймати на відстані сотень миль. Через більш високу частоту радіосигнали FM діапазону не можуть виїжджати далеко за візуальний горизонт; обмежуючи відстань прийому приблизно до 40 миль (64 км), і його можна перекрити пагорбами між передавачем і приймачем. Однак FM-радіо менш сприйнятливі до перешкод від радіошуму (RFI, статика) і мають більшу

точність; краща частотна характеристика та менше спотворення звуку, ніж АМ. Як і FM, сигнали DAB пересуваються по лінії зору, тому відстані прийому обмежуються зоровим горизонтом приблизно на 30–40 миль (48–64 км).

Радіоприймач підключений до антени, яка перетворює частину енергії від вхідної радіохвилі в крихітну радіочастоту змінного струму, яка подається на вхід приймача. Антена зазвичай складається з набору металевих провідників. Коливальне електричне та магнітне поля радіохвилі штовхають електрони в антені вперед і назад, створюючи коливальну напругу.

Практичні радіоприймачі виконують три основні функції сигналу від антени: фільтрація, посилення та демодуляція.

*Смугова фільтрація:* радіохвилі від багатьох передавачів проходять по повітрю одночасно, не заважаючи один одному. Вони можуть бути розділені в приймачі, оскільки вони мають різну частоту; тобто радіохвиля від кожного передавача коливається з різною швидкістю. Для відокремлення потрібного радіосигналу смуговий фільтр дозволяє пропускати частоту бажаної радіопередачі та блокує сигнали на всіх інших частотах.

Смуговий фільтр складається з одного або декількох резонансних схем (налаштованих схем). Резонансна схема пов'язана між входом антени та землею. Коли вхідний радіосигнал знаходиться на резонансній частоті, резонансна схема має високий опір і радіосигнал від потрібної станції передається на наступні етапи приймача. На всіх інших частотах резонансна схема має низький опір, тому сигнали на цих частотах проводяться до землі.

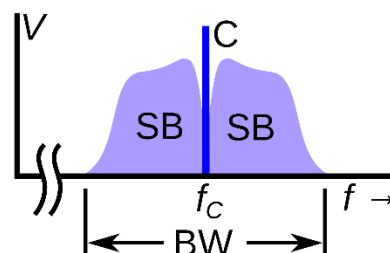


Рисунок 2.1. Частотний спектр радіосигналу від передавача АМ або FM

Інформація (модуляція) у радіопередачі міститься у двох вузьких смугах частот, званих бічними смугами (SB) по обидві сторони від несучої частоти (C), тому фільтр повинен проходити смугу частот, а не лише одну частоту. Діапазон частот, що приймається приймачем, називається його смугою пропускання (PB), а ширина смуги пропускання в кілогерцах називається шириною смуги (BW). Пропускна здатність фільтра повинна бути достатньо широкою, щоб пропускати бічні смуги без спотворень, але досить вузькою, щоб блокувати будь-які перешкоджаючі передачі на сусідніх частотах (таких як на рис. 2.2). Здатність приймача відхиляти небажані радіостанції, близькі за частотою до потрібної станції, є важливим параметром, який називається вибірковістю, що визначається фільтром. У сучасних приймачах часто використовуються кварцові кристалічні, керамічні резонатори або поверхневі акустичні хвилі (SAW), які мають більш високу вибірковість порівняно з мережами конденсаторно-індукторних налаштованих схем.

Частотний спектр радіосигналу від передавача АМ або FM (рис.2.2) складається з компонента (C) на частоті несучої хвилі  $f_C$ , з модуляцією, що міститься у вузьких смугах частот, званих бічними смугами (SB), трохи вище і нижче носія.

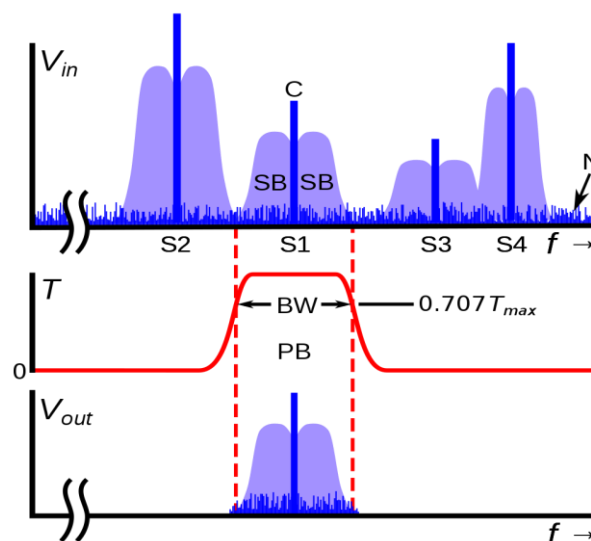


Рисунок 2.2. Передача сигналу

Щоб вибрати конкретну станцію, радіо "налаштовується" на частоту потрібного передавача. Радіо має циферблат або цифровий дисплей, що показує частоту, на яку він налаштований. *Налаштування* – це регулювання частоти смуги пропускання приймача до частоти потрібного радіопередавача. Поворот ручки настройки змінює резонансну частоту налаштованої схеми. Коли резонансна частота дорівнює частоті радіопередавача, налаштована схема коливається у відповідності, передаючи сигнал на решту приймача.

На рис. 2.2 зображено процес вибору смуговим фільтром одного радіосигналу  $S_1$  з усіх радіосигналів, прийнятих антеною. Зверху на графіках показано напруга від антени, поданої до фільтра  $V_{in}$ , передавальна функція фільтра  $T$  і напруга на виході фільтра  $V_{out}$  як функція частоти  $f$ . Функція передачі  $T$  – це кількість сигналу, який надходить через фільтр на кожній частоті:

$$V_{out}(f) = T(f)V_{in}(f). \quad (1.1)$$

*Ампліфікація:* Потужність радіохвиль, що приймаються приймальною антеною, зменшується на квадрат відстані від передавальної антени. Навіть при потужних передавачах, які використовуються в радіомовленні, якщо приймач знаходиться на відстані декількох миль від передавача, потужність, перехоплена антеною приймача, дуже мала, можливо, така ж низька, як піковат. Для збільшення потужності відновленого сигналу ланцюг підсилювача використовує електричну потужність від батарей або настінного штекера, щоб збільшити амплітуду (напруги або струму) сигналу. У більшості сучасних приймачів електронними компонентами, які виконують фактичне підсилення, є транзистори.

Приймачі зазвичай мають кілька етапів посилення: радіосигнал від смугового фільтра підсилюється, щоб зробити його досить потужним для управління демодулятором, тоді звуковий сигнал від демодулятора посилюється, щоб зробити його досить потужним для роботи динаміка. Ступінь посилення радіоприймача вимірюється параметром, який називається його чутливістю, яка є мінімальною силою сигналу станції на

антені, виміряною в мікровольтах, необхідною для чіткого прийому сигналу, з певним співвідношенням сигнал / шум. . Оскільки легко підсилити сигнал до будь-якої бажаної міри, обмеженням чутливості багатьох сучасних приймачів є не ступінь посилення, а випадковий електронний шум, присутній у ланцюзі, який може заглушити слабкий радіосигнал.

*Демодуляція.* Після фільтрування та посилення радіосигналу приймач повинен витягувати інформаційний модульований сигнал з модульованої хвилі несучої радіочастоти. Це робиться ланцюгом, який називається демодулятором (детектором). Кожен тип модуляції вимагає різного типу демодулятора:

- АМ-приймач, який приймає (амплітудно модульований) радіосигнал, використовує демодулятор АМ
- FM-приймач, який приймає сигнал, модульований частотою, використовує демодулятор FM
- приймач FSK, який приймає клавішу зсуву частоти (використовується для передачі цифрових даних у бездротових пристроях), використовує демодулятор FSK

Багато інших видів модуляції також використовуються для спеціалізованих цілей.

Сигнал модуляції, що виводиться демодулятором, зазвичай підсилюється для збільшення його сили, потім інформація перетворюється назад у зручну для людини форму через перетворювач. Звуковий сигнал, що представляє звук, як у радіомовленні, перетворюється у звукові хвилі за допомогою навушника або гучномовця. Відеосигнал, що представляє рухомі зображення, як у телевізійному приймачі, перетворюється на світло за допомогою дисплея. Цифрові дані, як у бездротовому модемі, застосовуються як вхід до комп'ютера або мікропроцесора, який взаємодіє з людьми.

У найпростішому типі радіоприймача, який називається налаштованим приймачем радіочастот (TRF), три вищезгадані функції виконуються послідовно:

- суміш радіосигналів з антени фільтрується для отримання сигналу потрібного передавача ;
- ця коливальна напруга направляється через підсилювач радіочастоти для підвищення її сили до рівня, достатнього для приведення демодулятора;
- демодулятор відновлює сигнал модуляції (який у приймачах широкомовної передачі є звуковим сигналом, напруга, що коливається зі швидкістю частоти звуку, що представляє звукові хвилі) з модульованої хвилі радіоносія;
- сигнал модуляції посилюється далі в аудіо підсилювачі, потім застосовується до гучномовця або навушника для перетворення його на звукові хвилі.

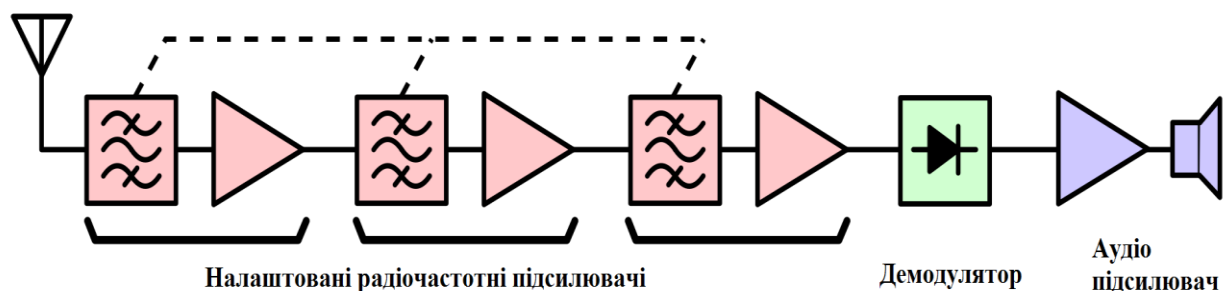


Рисунок 2.3. Структурна схема налаштованого радіочастотного приймача

Щоб досягти достатньої вибіркової здатності для відхилення станцій на сусідніх частотах, довелося використовувати кілька каскадних ступінь смугового фільтра. Пунктирна лінія вказує, що смугові фільтри повинні бути налаштовані разом.

Хоча приймач TRF використовується в декількох програмах, він має практичні недоліки, завдяки яким він поступається супергетеродинному



приймачу, який використовується в більшості застосунків. Недоліки випливають з того, що в TRF фільтрування, посилення та демодуляція здійснюються на високій частоті вхідного радіосигналу. Пропускна здатність фільтра збільшується з його центральною частотою, тому, коли приймач TRF налаштований на різні частоти, його пропускна здатність змінюється. Найголовніше, що зростаюча перевантаженість радіочастотного спектру вимагає, щоб радіоканали були розташовані дуже близько один до одного за частотою. Вкрай важко побудувати фільтри, що працюють на радіочастотах, які мають достатньо вузьку пропускну здатність для розділення близько розташованих радіостанцій. Приймачі TRF, як правило, повинні мати багато каскадних етапів настройки для досягнення адекватної вибірковості.

Супергетеродинний приймач, винайдений у 1918 році Едвіном Армстронгом, є конструкцією, що використовується майже у всіх сучасних приймачах, крім кількох спеціалізованих застосувань.

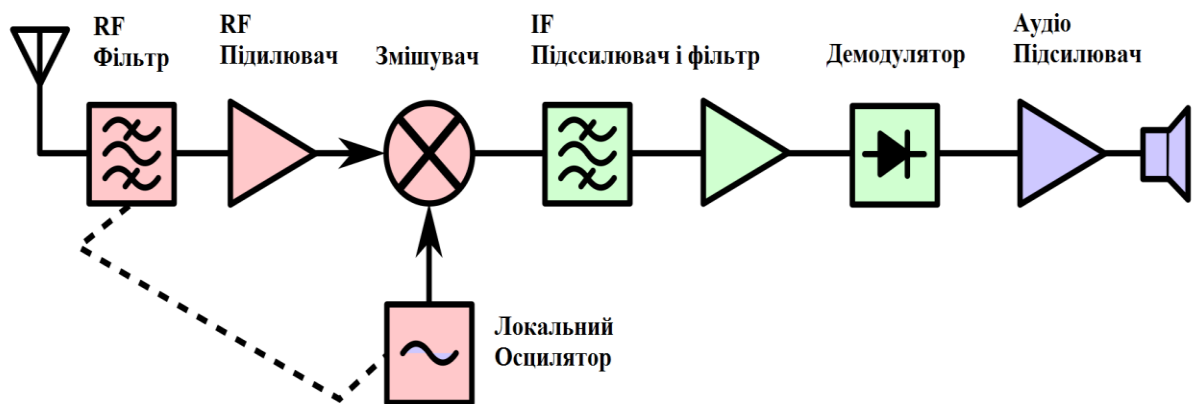


Рисунок 2.4. Структурна схема супергетеродинного приймача

У супергетеродинному приймачі радіочастотний сигнал від антени зміщується вниз до нижчої "проміжної частоти" перед його обробкою. Вхідний радіочастотний сигнал від антени зміщується з немодульованим сигналом, що генерується локальним осцилятором (ЛО) у приймачі. Змішування проводиться в нелінійному контурі під назвою "змішувач". Результатом на виході змішувача є гетеродина або частота биття при різниці між цими двома частотами. Ця нижча частота називається проміжною

частотою (ПЧ). ІЧ-сигнал також має всю інформацію, яка була присутня в вихідному радіочастотному сигналі. ІЧ-сигнал проходить через ступінь фільтру та підсилювача, потім демодулюється в детекторі, відновлюючи початкову модуляцію.

Приймач легко настроїти; для отримання іншої частоти необхідно лише змінити локальну частоту генератора. Етапи приймача після змішувача працюють з фіксованою проміжною частотою (ПЧ), тому діапазон частотного фільтра не повинен бути налаштований на різні частоти. Фіксована частота дозволяє сучасним приймачам використовувати складні кварцові кристали, керамічний резонатор або поверхневі акустичні хвилі (SAW) ІФ-фільтри, які мають дуже високі коефіцієнти  $Q$ , для поліпшення селективності.

ВЧ-фільтр на передньому кінці приймача необхідний для запобігання перешкод від будь-яких радіосигналів на частоті зображення. Без вхідного фільтра приймач може приймати вхідні радіочастотні сигнали з двома різними частотами. Приймач може бути розроблений для прийому на будь-якій з цих двох частот; якщо приймач призначений для прийому на одній, будь-яка інша радіостанція або радіо шум на іншій частоті може проходити через нього і перешкоджати бажаному сигналу. Один регульований етап фільтра РФ відхиляє частоту зображення; оскільки вони відносно далекі від бажаної частоти, простий фільтр забезпечує адекватне відхилення. Відхилення перешкоджаючих сигналів, значно ближчих за частотою до потрібного сигналу, обробляється декількома різко налаштованими ступенями підсилювачів проміжної частоти, яким не потрібно змінювати їх налаштування. Цей фільтр не потребує великої вибіркової, але, оскільки приймач налаштований на різні частоти, він повинен "відстежувати" в тандемі з локальним генератором. РЧ-фільтр також служить для обмеження пропускну здатності, застосованої до підсилювача РФ, запобігаючи його перевантаженню сильними позадіапазонними сигналами.

Для досягнення як хорошого відхилення зображення, так і селективності багато сучасних супергетеродинних приймачів використовують дві проміжні частоти; це називається супергетеродином з подвійним перетворенням. Вхідний радіочастотний сигнал спочатку змішується з одним локальним сигналом генератора в першому змішувачі, щоб перетворити його на високу частоту ІЧ, та забезпечити ефективну фільтрацію частоти зображення, потім цей перший ПЧ змішується з другим локальним сигналом генератора в секунду змішувач для перетворення його на низьку частоту ІФ для гарної смугової фільтрації. Деякі приймачі використовують навіть потрійне перетворення.

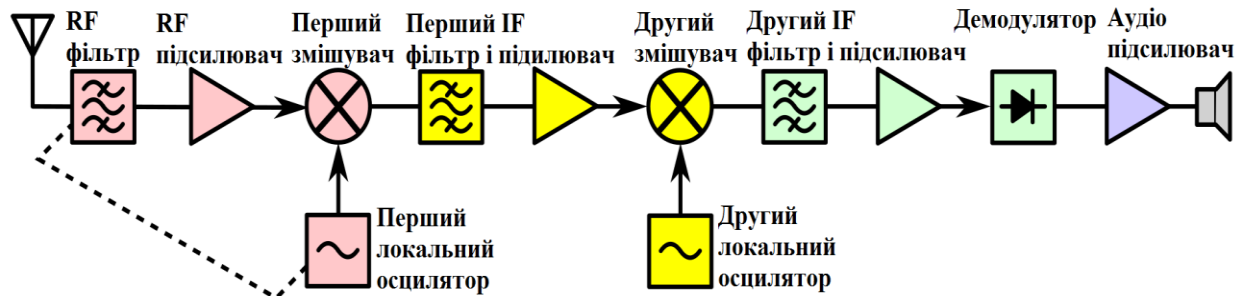


Рисунок 2.5. Структурна схема приймача супергетеродину з подвійним перетворенням

Утворення додаткових етапів супергетеродинний приймач компенсує забезпеченням переваги більшої селективності, ніж це можна досягти за допомогою конструкції TRF. Там, де використовуються дуже високі частоти, лише на початковій стадії приймача потрібно працювати на найвищих частотах; інші етапи можуть забезпечити значну частину посилення приймача на нижчих частотах, що може бути простішим в управлінні. Налаштування спрощено порівняно з багатоступеневим дизайном TRF, і лише два етапи потребують відстеження діапазону настройки. Загальне підсилення приймача ділиться між трьома підсилювачами на різних частотах; RF, IF та аудіо підсилювач. Це зменшує проблеми із зворотним зв'язком та паразитарними коливаннями, які виникають у приймачах, де більшість ступенів підсилювача працюють з тією ж частотою, що і в приймачі TRF.

Найважливішою перевагою є те, що кращої селективності можна досягти, виконавши фільтрування на нижній проміжній частоті. Одним з найважливіших параметрів приймача є його пропускна здатність, смуга частот, яку він приймає. Для того, щоб відхилити поблизу перешкоджаючі станції або шум, потрібна вузька смуга пропускання. У всіх відомих методах фільтрації пропускна здатність фільтра збільшується пропорційно частоті, тому, виконуючи фільтрацію в нижньому  $f_{IF}$  замість частоти вихідного радіосигналу  $f_{RF}$  можна досягти більш вузької пропускної здатності. Сучасне радіомовлення та телебачення, мобільні телефони та інші послуги зв'язку, з їх вузькою шириною каналів, було б неможливим без супергетеродинних приймачів.

Супергетеродинні приймачі по суті замінили всі попередні конструкції приймачів. Розвиток сучасної напівпровідникової електроніки заперечував переваги конструкцій (таких, як регенеративний приймач), які використовували менше вакуумних труб. Супергетеродинний приймач пропонує чудову чутливість, стабільність частоти та вибірковість. У порівнянні з налаштованою конструкцією радіочастотного приймача (TRF), супергермети пропонують кращу стабільність, оскільки налаштований осцилятор легше реалізувати, ніж налаштований підсилювач. Працюючи з нижчою частотою, фільтри IF можуть давати більш вузькі смуги пропускання з тим же коефіцієнтом Q, що і еквівалентний RF-фільтр. Фіксований IF також дозволяє використовувати кристалічний фільтр або подібні технології, які неможливо налаштувати. Регенеративні та суперрегенеративні приймачі пропонують високу чутливість, але часто страждають від проблем зі стабільністю, що ускладнює їх роботу.

Незважаючи на те, що переваги супергетеродинного приймача є величезними, є кілька недоліків, з якими доведеться зустрічатись на практиці.

Одним з головних недоліків супергетеродинного приймача є проблема частоти зображення. У гетеродинних приймачах частота зображення є

небажаною вхідною частотою, що дорівнює частоті станції плюс (або мінус) подвоєна проміжна частота. Частота зображення призводить до того, що дві станції приймаються одночасно, тим самим створюючи перешкоди. Частоти зображення можуть бути усунені достатнім ослабленням вхідного сигналу радіочастотним фільтром підсилювача приймача супергетеродину.

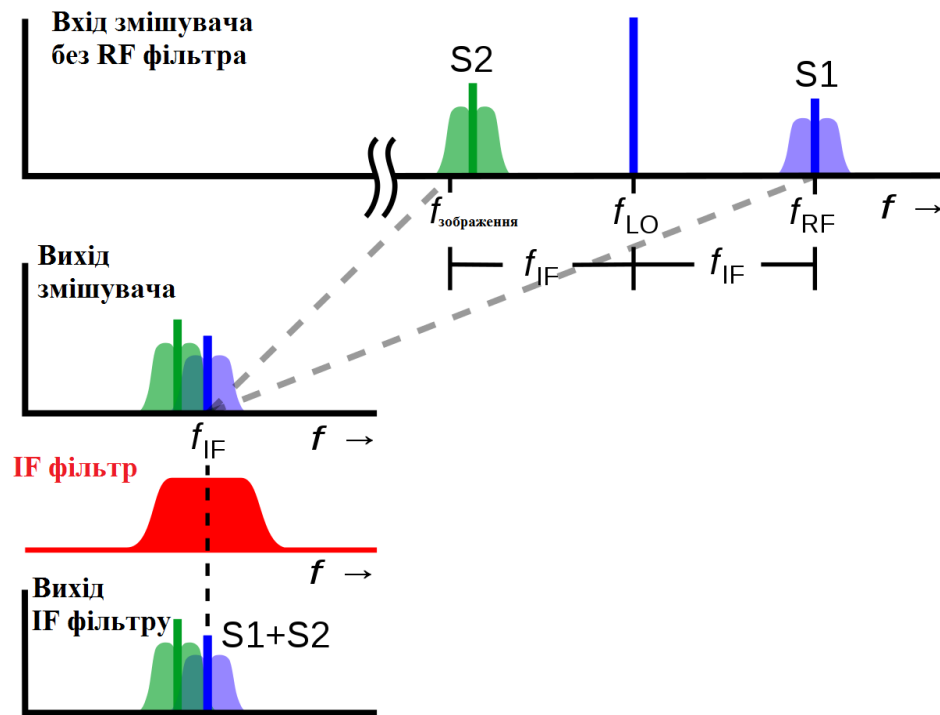


Рисунок 2.6. Проблематика реакції на зображення в супергетеродині

Горизонтальні осі частотні, а вертикальні – напруга. Без відповідного радіочастотного фільтра будь-який сигнал S2 (зелений) на частоті зображення  $f_{\text{зображення}}$  також гетеродійований до частоти ІЧ  $f_{IF}$  разом з потрібним радіосигналом S1 (синім) на  $f_{RF}$ , тому вони обидва проходять через фільтр IF (червоний). Таким чином, S2 втручається в S1.

Небажану частоту називають зображенням потрібної частоти, оскільки це "дзеркальне зображення" потрібної частоти, відображене  $f_0$ . Приймач з неадекватною фільтрацією на своєму вході одночасно буде приймати сигнали на двох різних частотах: бажану частоту та частоту зображення. Будь-який шум або випадкова радіостанція на частоті зображення може перешкоджати прийому потрібного сигналу.

Ранні приймачі Autodyne, як правило, використовували КЧ лише 150 кГц або близько того, оскільки важко підтримувати надійні коливання, якщо використовувались більш високі частоти. Як наслідок, більшість приймачів Autodyne потребували досить розвинених мереж налаштування антен, часто із залученням подвійних налаштованих котушок, щоб уникнути перешкод зображення. Пізніше супергелі використовували трубки, спеціально розроблені для використання осцилятора / змішувача, які змогли надійно працювати з набагато вищими КЧ, зменшуючи проблему перешкод зображення та дозволяючи простішою та дешевшою схемою повітряної настройки.

Чутливість до частоти зображення може бути зведена до мінімуму лише фільтром, який передує міксеру, або більш складною схемою змішувача, що пригнічує зображення. У більшості приймачів це досягається смуговим фільтром на передньому кінці РФ. У багатьох регульованих приймачах смуговий фільтр налаштовується в тандемі з локальним осцилятором.

Відхилення зображення є важливим фактором вибору проміжної частоти приймача. Чим далі одна від одної частота смуги частот і частота зображення, тим більше смуговий фільтр буде послаблювати будь-який заважаючий сигнал зображення. Оскільки розділення частоти між діапазоном частоти і частотою зображення дорівнює  $2f_{IF}$ , більш висока проміжна частота покращує відхилення зображення. можливо, можна використовувати досить високий перший ПЗ, якщо фіксований налаштований радіочастотний етап може відхиляти сигнали зображення.

Здатність приймача відхиляти перешкоджаючі сигнали на частоті зображення вимірюється коефіцієнтом відхилення зображення. Це відношення (в децибелах) виходу приймача з сигналу на прийнятій частоті, до його виходу для сигналу однакової сили на частоті зображення.

Важко утримувати бродяче випромінювання від місцевого генератора нижче рівня, який може виявити сусідній приймач. Локальний осцилятор

приймача може діяти як СВ передавач малої потужності. Отже, може бути взаємне втручання в роботу двох або більше приймачів супергетеродину в безпосередній близькості.

Метод істотного зменшення локального випромінювання генератора від антени приймача полягає у використанні радіочастотного підсилювача між антенною приймача та його ступенем змішувача.

Місцеві осцилятори, як правило, генерують сигнал однієї частоти, який має незначну амплітудну модуляцію, але деяку модуляцію випадкової фази. Будь-яка з цих домішок поширює частину енергії сигналу на бічні смуги частот. Це спричиняє відповідне розширення частотної відповіді приймача, що перешкоджає меті зробити дуже вузький приймач пропускну здатності, такий як прийом цифрових сигналів низької швидкості. Необхідно бути обережним, щоб мінімізувати шум фазового генератора, як правило, гарантуючи, що коливання ніколи не переходить у нелінійний режим.

## 2.2. Аналого-цифрове перетворення сигналів

Аналого-цифрове перетворення – процес зчитування аналогового сигналу з будь-якого джерела та подальше перетворення його у цифровий сигнал за допомогою ряду математичних функцій. Існують три послідовні кроки такого перетворення.

*Дискретизація сигналу* – перетворення функції безперервної за часом та областю значень що можуть набуватись, в функцію, дискретну за часом, та необмежену за значеннями. Дискретизацію аналогового сигналу можна описати як процес визначення кроку дискретизації з функції безперервної за часом  $x(t)$ . Звісно, маючи дискретизований сигнал, можна відновити вихідний сигнал, проте він може бути спотвореним, через втрату значень між інтервалами дискретизації. Для повного відтворення аналогового сигналу, повинна дотримуватись теорема Найквіста - Шеннона, яка стверджує, що сигнал може бути відтворений, якщо частота дискретизації буде вдвічі більша за максимальну спектральну частоту сигналу.

*Квантування* – розбиття діапазону значень відліку сигналу на скінченне число рівнів і округлення цих значень до найближчого з рівнів. Такий вид квантування називається *скалярним*. Окрім цього, можливе розбиття множини значень, що можуть набуватись, на скінченну множину областей з подальшою заміною значень на ідентифікатор відповідної області. Такий метод квантування називається *векторним*. На відмінно від дискретизації, що спирається на часову складову сигналу, квантування зводить сигнал до конкретних значень, тобто округлює його до найближчого до нього рівня.

Останнім кроком аналого-цифрового перетворення є *кодування сигналу* – процес перетворення квантового сигналу в цифрове подання. При кодуванні сигналу визначається кількість бітів на кожен рівень квантування (розрядність квантування або глибина). Чим більше рівнів квантування і чим більша його глибина, тим більше цифровий сигнал буде відповідати аналоговому. При рівномірному квантуванні, глибина квантування визначає динамічний діапазон, що вимірюється в децибелах (1 біт на 6 дБ)

Таке перетворення зазвичай виконується за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП). АЦП перетворює аналоговий сигнал безперервного часу та безперервної амплітуди в цифровий сигнал дискретного часу та дискретної амплітуди. Перетворення передбачає квантування вхідних даних, тому воно обов'язково вводить невелику кількість помилок або шуму. Крім того, замість того, щоб постійно здійснювати перетворення, АЦП здійснює перетворення періодично, відбираючи вхід та обмежуючи допустиму смугу пропускання вхідного сигналу.

Продуктивність АЦП насамперед характеризується його пропускнуою здатністю та співвідношенням сигнал/шум (SNR). Пропускна здатність АЦП характеризується насамперед швидкістю вибірки. На SNR АЦП впливає безліч факторів, включаючи роздільну здатність, лінійність та точність (наскільки добре рівні квантування відповідають справжньому аналоговому



сигналу), накладання спектрів. SNR АЦП часто підсумовується з точки зору його ефективної кількості бітів – кількості бітів кожного повернутого вимірювання, які в середньому не є шумом. Ідеальний АЦП має ефективну кількість бітів, що дорівнює його роздільній здатності. АЦП вибираються так, щоб вони відповідали ширині смуги частот і вимагали SNR для оцифрування. Якщо АЦП працює зі швидкістю вибірки, що вдвічі перевищує смуги пропускання сигналу, то згідно теореми відбору проб Найквіста – Шеннона можлива ідеальна реконструкція. Наявність помилки квантування обмежує SNR навіть ідеального АЦП. Однак, якщо це співвідношення АЦП перевищує потужність вхідного сигналу, його ефектами можна знехтувати, що призводить до фактично ідеального цифрового зображення аналогового вхідного сигналу.

Роздільна здатність перетворювача вказує кількість дискретних значень, які він може створити за діапазон аналогових значень. Роздільна здатність визначає величину похибки квантування  $i$ , отже, визначає максимально можливе середнє SNR для ідеального АЦП без використання надвиугу. Значення, як правило, зберігаються в електронному вигляді у двійковій формі, тому роздільна здатність зазвичай виражається як глибина звукового біта. Наприклад, АЦП з роздільною здатністю 8 біт може кодувати аналоговий вхід до одного на 256 різних рівнях ( $2^8 = 256$ ). Значення можуть представляти діапазони від 0 до 255 (тобто без знакове ціле число) або від 128 до 127 (тобто знакове ціле число), залежно від програми.

Роздільну здатність можна також визначити електричним шляхом і виразити у вольтах. Зміна напруги, необхідна для гарантування зміни рівня вихідного коду, називається найменш значущою бітовою напругою. Роздільна здатність  $Q$  АЦП дорівнює найменшій значущій бітовій (LSB) напрузі. Роздільна здатність напруги АЦП дорівнює його загальному діапазону вимірювання напруги, поділеному на кількість інтервалів:

$$Q = \frac{E_{FSR}}{2^M}, \quad (2.1)$$

де  $M$  – роздільна здатність АЦП у бітах, а  $E_{FSR}$  – повний діапазон напруги (також званий "прольотом").  $E_{FSR}$  задається наступним чином:

$$E_{FSR} = V_{RefHi} - V_{RefLow} , \quad (2.2)$$

де  $V_{RefHi}$  і  $V_{RefLow}$  – це верхня і нижня крайності відповідно, які можна кодувати.

Зазвичай кількість інтервалів напруги задається числом  $N = 2^M$ , де  $M$  – роздільна здатність АЦП у бітах. Тобто один інтервал напруги призначається між двома послідовними рівнями коду.

Приклад Схема кодування зображений на рис. 2.7.

Повний діапазон вимірювання шкали = 0 до 1 вольт

Дозвіл АЦП – 3 біти:  $2^3 = 8$  рівнів квантування (коди)

Роздільна здатність напруги АЦП,  $Q = 1 \text{ В} / 8 = 0,125 \text{ В}$ .

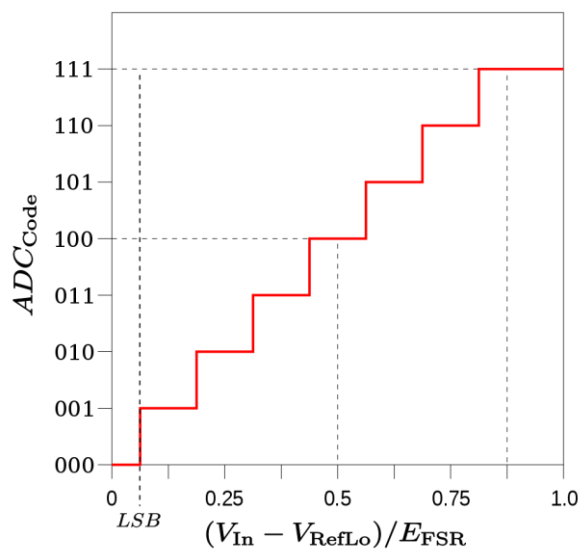


Рисунок 2.7. 8-рівнева схема кодування АЦП

У багатьох випадках корисна роздільна здатність перетворювача обмежена співвідношенням сигнал/шум та іншими помилками в загальній системі, вираженими як ефективна кількість бітів.

*Помилка квантування* вводиться шляхом квантування в ідеальному АЦП. Це помилка округлення між аналоговою вхідною напругою до АЦП та цифровим значенням на виході. Помилка нелінійна і залежна від сигналу. В

ідеальному АЦП, де похибка квантування рівномірно розподілена між  $-1/\text{LSB}$  та  $1/2 \text{ LSB}$ , а сигнал має рівномірний розподіл, що охоплює всі рівні квантування, співвідношення сигнал-квантування-шум ( $\text{SQNR}$ ) задається:

$$\text{SQNR} = 20 \log_{10}(2^Q), \quad (2.3)$$

де  $Q$  – кількість бітів квантування. Наприклад, для 16-бітного АЦП похибка квантування на 96,3 дБ нижче максимального рівня.

Похибка квантування розподіляється від постійного струму до частоти Найквіста, отже, якщо частина пропускної здатності АЦП не використовується, як у випадку з передискретизацією, частина помилок квантування відбуватиметься поза межами діапазону, що ефективно покращує  $\text{SQNR}$  для пропускної здатності в використанні. У надпробовій системі формування шуму може бути використане для подальшого збільшення  $\text{SQNR}$  шляхом витіснення більшої помилки квантування з діапазону.

Існує дуже мала кількість випадкового шуму (наприклад, білий шум), який додається до входу перед перетворенням. Його дія полягає в рандомізації стану  $\text{LSB}$  на основі сигналу. Замість того, щоб сигнал просто відсікався зовсім на низьких рівнях, він розширює ефективний діапазон сигналів, які АЦП може перетворити, за рахунок незначного збільшення шуму. Це не може покращити лінійність, і, отже, точність не обов'язково підвищується, проте у АЦП такий метод часто використовується для покращення продуктивності.

Спотворення квантування в радіосигналі дуже низького рівня по відношенню до бітової глибини АЦП корелює з сигналом і звучить спотворено. З відмиранням спотворення перетворюється на шум. Неспотворений сигнал може бути відновлений точно шляхом усереднення в часі. Такий метод також використовується в інтеграційних системах, таких як лічильники електроенергії. Оскільки значення додаються разом, тремтіння дає результати, більш точні, ніж  $\text{LSB}$  аналого-цифрового перетворювача.

АЦП має кілька джерел помилок. Помилка квантування та (якщо припустити, що АЦП має бути лінійним) нелінійність є невід'ємною для будь-якого перетворення аналого-цифрового. Ці помилки вимірюються в одиниці, що називається найменш значущим бітом (LSB). У наведеному вище прикладі восьмирозрядного АЦП помилка одного LSB становить  $1/256$  повного діапазону сигналу або приблизно 0,4%.

Усі АЦП страждають від помилок нелінійності, спричинених їх фізичними недосконалостями, внаслідок чого їх вихід відхиляється від лінійної функції (або якоїсь іншої функції, у випадку навмисно нелінійного АЦП) їх введення. Ці помилки іноді можна усунути калібруванням або запобігти тестуванням. Важливими параметрами лінійності є інтегральна нелінійність та диференціальна нелінійність. Ці нелінійності вводять спотворення, які можуть знизити ефективність сигналу / шуму АЦП і, таким чином, знизити його ефективну роздільну здатність.

Під час оцифрування синусоїди  $x(t) = A \sin(2\pi f_0 t)$ , використання неідеального лічильника для відбору проб призведе до певного відхилення від справжньої періодичності імовірно періодичного сигналу, часто відносно опорного тактового сигналу. У програмах відновлення годинника це називається тремтінням часу. За умови, що фактична невизначеність часу вибірки через тримтіння лічильника дорівнює  $\Delta t$ , помилка, викликана цим явищем, може бути оцінена як:

$$E_{ap} \leq |x'(t)\Delta t| \leq 2A\pi f_0 \Delta t. \quad (2.4)$$

Це призведе до додаткового зафіксованого шуму, який зменшить ефективну кількість бітів нижче, ніж прогнозується лише помилкою квантування. Похибка дорівнює нулю для постійного струму, мала на низьких частотах, але значна при сигналах високої амплітуди та високої частоти. Вплив тремтіння на продуктивність можна порівняти з похибкою квантування:

$$\Delta t < \frac{1}{2^q \pi f_0}, \quad (2.5)$$

Тремтіння лічильника викликається фазовим шумом. Роздільна здатність АЦП з пропускнуою здатністю оцифрування між 1 МГц і 1 ГГц обмежена тремтінням. Для менших перетворень пропускнуої здатності, таких як вибірки аудіосигналів на частоті 44,1 кГц, тремтіння тактової частоти має менший вплив на продуктивність.

Аналоговий сигнал є безперервним у часі, і його потрібно перетворити на потік цифрових значень. Тому потрібно визначити швидкість, з якою нові цифрові значення відбираються з аналогового сигналу. Швидкість нових значень називається частотою дискретизації або частотою вибірки перетворювача. Постійно мінливий смуговий обмежений сигнал може бути відібраний, а потім вихідний сигнал може бути відтворений із значень дискретного часу за допомогою фільтра для відновлення. Теорема дискретизації Найкіста-Шеннона передбачає, що вірне відтворення вихідного сигналу можливе лише в тому випадку, якщо частота дискретизації перевищує вдвічі більшу частоту сигналу.

Таблиця 2.1. Залежність помилки квантизації від кількості біт АЦП

Розмір виходу (bit)	Частота сигналу						
	1 Hz	1 kHz	10 kHz	1 MHz	10 MHz	100 MHz	1 GHz
8	1,243 $\mu$ s	1.24 $\mu$ s	124 ns	1.24 ns	124 ps	12.4 ps	1.24 ps
10	311 $\mu$ s	311 ns	31.1 ns	311 ps	31.1 ps	3.11 ps	0.31 ps
12	77.7 $\mu$ s	77.7 ns	7.77 ns	77.7 ps	7.77 ps	0.78 ps	0.08 ps ("77.7fs")
14	19.4 $\mu$ s	19.4 ns	1.94 ns	19.4 ps	1.94 ps	0.19 ps	0.02 ps ("19.4fs")

Вихідний сигнал можна отримати з послідовності зразків, аж до границі Найквіста, шляхом передачі послідовності зразків через тип фільтрів низьких частот, що називається фільтром відновлення.

Оскільки практичний АЦП не може здійснити миттєве перетворення, вхідне значення обов'язково повинно бути постійним протягом часу, коли перетворювач здійснює перетворення. Вхідна схема, що називається зразком і утримуванням, виконує це завдання в більшості випадків використовуючи конденсатор для зберігання аналогової напруги на вході та за допомогою електронного перемикача або затвора для відключення конденсатора від входу. Багато інтегральних схем АЦП включають вибірку та утримують підсистему всередині.

АЦП працює шляхом вибірки значення вхідного сигналу через дискретні проміжки часу. За умови, що вхід дискретизується вище частоти Найквіста, визначеної як подвійна найвища частота, що цікавить, то всі частоти сигналу можуть бути реконструйовані. Якщо частоти, що перевищують половину частоти Найквіста, відбираються у вибірку, вони неправильно виявляються як нижчі частоти, процес називають згладжуванням. Згладжування відбувається через те, що миттєва вибірка функції у два чи менші рази за цикл призводить до пропущених циклів, а отже, до появи неправильно нижчої частоти. Наприклад, синусова хвиля 2 кГц, що відбирається на вибірці при 1,5 кГц, буде реконструйована як синусоїда частотою 500 Гц.

Щоб уникнути згладжування, вхід до АЦП повинен фільтрувати границю низьких частот, щоб видалити частоти вище половини швидкості вибірки. Цей фільтр називається фільтром проти згладжування і є важливим для практичної системи АЦП, яка застосовується до аналогових сигналів з більш високим вмістом частоти. У додатках, де захист від згладжування є вкрай важливим, надмірне утворення може бути використане для значного зменшення або навіть його усунення.

Сигнали часто відбираються з мінімальною необхідною швидкістю для економії, в результаті чого введений квантовуючий шум – це білий шум, що поширюється по всій смузі проходу перетворювача. Якщо сигнал дискретизувати зі швидкістю, значно вищою за швидкість Найквіста, а потім фільтрувати цифровим шляхом, щоб обмежити його на пропускну здатність сигналу, то можна отримати наступні переваги:

- Цифрові фільтри можуть мати кращі властивості (більш різкий перехід, фаза), ніж аналогові фільтри, тому можна реалізувати більш чіткий фільтр, що запобігає згладжуванню, і тоді можна знизити частоту дискретизації, що надасть кращий результат
- 20-розрядний АЦП може бути зроблений як 24-бітний АЦП зі збільшеною частотою передискретизації у 256 разів
- SNR через квантування шуму буде вище, ніж при використанні всього наявного діапазону. За допомогою цієї методики можна отримати ефективну роздільну здатність, та більшу, ніж ту, що надає сам перетворювач

Метод рандомізації може бути використаний для значного поліпшення лінійності будь-якого типу АЦП, але особливо миттєвого та послідовного типів наближення. Для будь-якого АЦП відображення від вхідної напруги до цифрового вихідного значення не є точно функцією підлоги або стелі, як належить. У нормальних умовах імпульс певної амплітуди завжди перетворюється на цифрове значення. Проблема полягає в тому, що діапазони аналогових значень для оцифрованих значень не всі однакової ширини, а диференціальна лінійність зменшується пропорційно з розбіжністю від середньої ширини. Метод рандомізації використовує усереднюючий ефект для подолання цього явища. До вибіркової вхідної напруги додається випадкова, але відома аналогова напруга. Потім вона перетворюється в цифровий вигляд і еквівалентна цифрова сума

віднімається, тим самим відновлюючи його до початкового значення. Перевага полягає в тому, що перетворення відбулося у випадковій точці. Статистичний розподіл кінцевих рівнів визначається середньозваженим значенням за область діапазону АЦП. Це в свою чергу десенсибілізує його до ширини будь-якого конкретного рівня.

Система цифрової обробки сигналів, сигнали якої походять з джерел безперервного часу, включає кілька будівельних блоків, а саме: аналого-цифровий (А / Ц) перетворювач; система цифрової обробки сигналів (DSP); цифро-аналоговий (Ц / А) перетворювач; і фільтр низьких частот. Малюнок 1.5 ілюструє типові установки цифрової обробки сигналів, де:

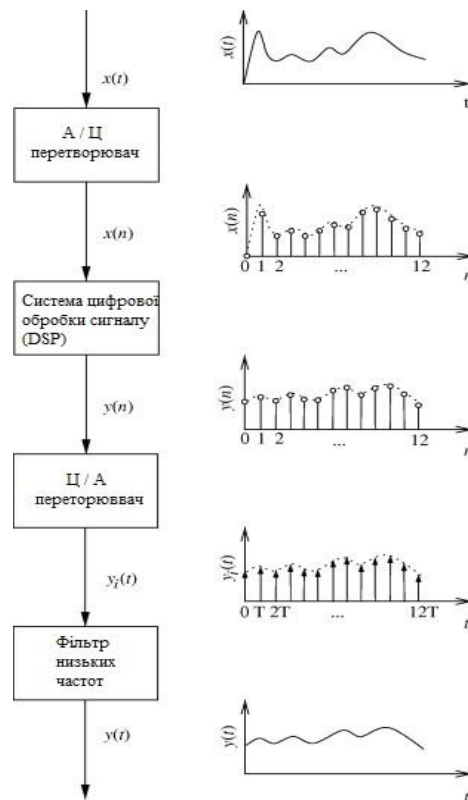


Рисунок 2.8. Типове налаштування системи цифрової обробки сигналів

- Перетворювач А / Ц виробляє набір зразків у однаково проміжних часових інтервалах, які можуть зберігати інформацію сигналу безперервного часу у випадку, якщо останній обмежений смугою. Ці зразки перетворюються в числове представлення для того, щоб вони були застосовані до системи DSP.



- DSP виконує потрібне відображення між вхідними та вихідними послідовностями.
- Перетворювач Ц / А створює набір аналогічно проміжок часу аналогових зразків, що представляють собою вихід системи.
- Фільтр низьких частот інтерполює аналогові зразки для отримання плавного сигналу безперервного часу.

Умови, яким повинен відповідати сигнал безперервного часу, щоб його вибіркова версія зберігала інформацію про вихідний сигнал, продиктовану теоремою вибірки. Ця теорема визначає, що смуговий обмежений сигнал безперервного часу може бути теоретично відтворений з його вибіркової версії шляхом фільтрації послідовності з аналоговим фільтром із заданою частотною характеристикою.

Важливо також зазначити, що під час обробки сигналів у цифровій області вони піддаються помилкам квантування, таким як: помилки округлення, що виникають із внутрішніх арифметичних операцій, виконаних у сигналах; відхилення у відповіді фільтра через кінцеве представлення довжини слова коефіцієнтів множника, властивих операції обробки сигналу; і помилки внаслідок подання набутих сигналів безперервного часу з набором дискретних рівнів

Фактична реалізація системи DSP може покладатися на цифрові машини загального призначення, де користувач пише комп'ютерне програмне забезпечення для реалізації завдань DPS. Ця стратегія дозволяє швидко прототипувати та тестувати. Іншим засобом є використання спеціально доступних у продажу процесорів спеціального призначення, відомих як процесори цифрових сигналів, які здатні дуже ефективно виконувати суму операцій з продуктом. Ще один підхід – використання апаратного забезпечення спеціального призначення, призначеного для даної програми.

На рис.1.6 зображено сигнал безперервного часу, його оцифрована версія та відновлене подання безперервного часу. З рисунків 1.6 (a) до 1.6 (f) ми можемо помітити вплив низької частоти вибірки та невеликої кількості етапів квантування на процеси А / D та D / А.

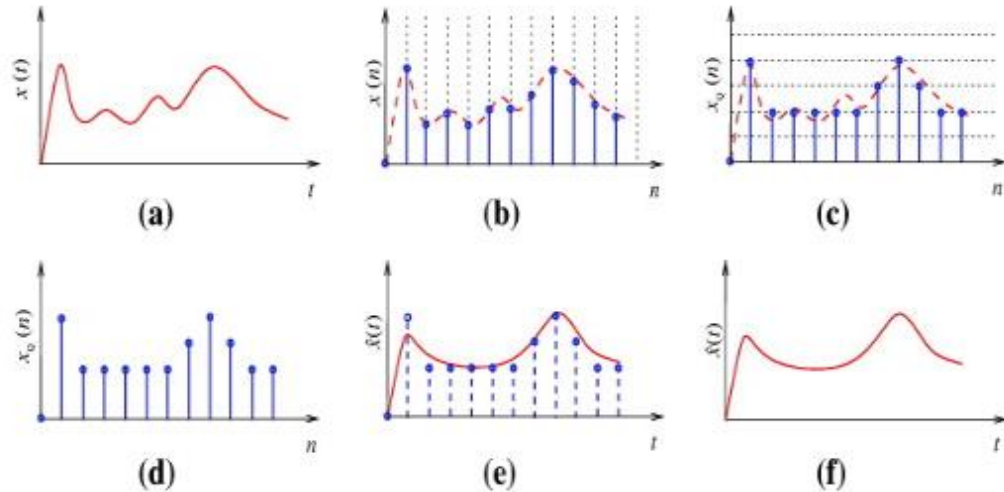


Рисунок 2.9. Вплив низької частоти вибірки та невеликої кількості етапів квантування на процеси А / Ц та Ц / А

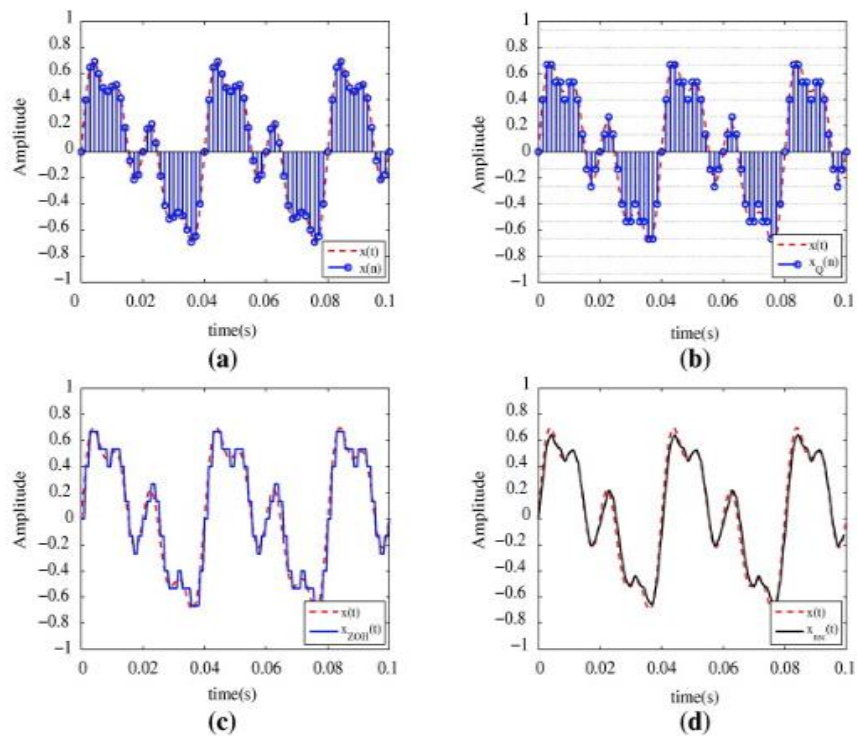


Рисунок 2.10 Етапи А / Ц та Ц / А перетворень

На рис. 2.10 є детальний приклад етапів, що тягнуть за собою перетворення  $A \rightarrow Ц$  та перетворення  $Ц \rightarrow A$ , де на рис. 2.10 (а) зображено сигнал безперервного часу разом з його однаково розташованими зразками. Потім ці зразки квантують, як показано на рис. 2.10 (b). Припускаючи, що квантовані зразки перетворюються в аналоговий сигнал через затримку нульового порядку, вихід перетворювача  $Ц \rightarrow A$  стає таким, як показано на рис. 2.10 (c). Відібраний і утримуваний сигнал безперервного часу фільтрується низькочастотним каналом з метою відновлення вихідного сигналу безперервного часу. Як можна помітити на рис. 2.10 (d), відновлений сигнал нагадує оригінал, де різниця походить від ефектів квантування та недіального фільтра нижніх частот на виході перетворювача  $Ц \rightarrow A$ .

### 2.3. Аналіз характеристик цифрових та аналогових фільтрів

*Аналогові фільтри* є основним складовим елементом обробки сигналів, який використовується в електроніці.

Пасивні лінійні електронні аналогові фільтри – це ті фільтри, які можна описати лінійними диференціальними рівняннями (лінійними); вони складаються з конденсаторів, індукторів і, іноді, резисторів (пасивних) і призначені для роботи на постійно змінюваних (аналогових) сигналах. Існує багато лінійних фільтрів, які не є аналогом в реалізації (цифровий фільтр), і є багато електронних фільтрів, які можуть не мати пасивної топології – обидва можуть мати однакову функцію передачі фільтрів, описану в цій статті. Аналогові фільтри найчастіше використовуються в програмах фільтрування хвиль, тобто там, де потрібно передавати окремі частотні компоненти та відхиляти інші від аналогових (безперервного часу) сигналів.

Аналогові фільтри відіграли важливу роль у розвитку електроніки. Особливо в галузі телекомунікацій, фільтри мали вирішальне значення в ряді технологічних проривів і були джерелом величезних прибутків для телекомунікаційних компаній. Тому не дивно, що рання розробка фільтрів тісно пов'язана з лініями електропередачі. Теорія ліній електропередачі

породила теорію фільтрів, яка спочатку мала дуже схожу форму, і основне застосування фільтрів було для використання на телекомунікаційних лініях електропередачі. Однак поява методи синтезу мережі значно підвищила ступінь контролю дизайнера.

Сьогодні часто віддається перевага фільтрації в цифровій області, де складні алгоритми реалізуються набагато простіше, але аналогові фільтри все ж знаходять застосування, особливо для простих завдань фільтрації низького порядку і часто все ще є нормою на більш високих частотах, де цифровий технологія все ще недоцільна, або, принаймні, менш економічна. По можливості, особливо на низьких частотах, аналогові фільтри зараз реалізуються у топології фільтрів, яка є активною, щоб уникнути намотування компонентів (тобто індукторів, трансформаторів тощо), необхідних пасивній топології.

Можливе проектування лінійних аналогових механічних фільтрів з використанням механічних компонентів, які фільтрують механічні коливання або акустичні хвилі. Незважаючи на те, що в механіці мало застосувань для таких пристроїв, вони можуть використовуватися в електроніці з додаванням перетворювачів для перетворення в електричну область і з неї. Дійсно, деякі з найбільш ранніх ідей для фільтрів були акустичними резонаторами, оскільки техніка електроніки в той час була погано вивчена. В принципі, конструкція таких фільтрів може бути досягнута повністю з точки зору електронних аналогів механічних величин, з кінетичною енергією, потенційною енергією та тепловою енергією, що відповідає енергії в індукторах, конденсаторах та резисторах відповідно.

Найбільш розповсюдженими видами аналогових фільтрів стали механічні аналогові фільтри, в яких з підтримкою механічних компонентів виконується фільтрація механічних вібрацій або акустичних хвиль. Такі фільтри можуть використовуватись у якості корегуючих ланок в системах автоматичного електронного регулювання. З точки зору математичного

опису лінійних аналогових фільтрів фізична сутність їх складаючих елементів не важлива.

Другий вид аналогових фільтрів – кристалічні фільтри, що використовуються для вузькосмугової фільтрації сигналів. Сигналом у таких фільтрах є механічна акустична хвиля, яка за допомогою перетворювача перетворюється в електричний сигнал на виході з кристалу.

Іншим видом фільтрів в обробці сигналів є цифрові фільтри.

*Цифровий фільтр* – це система, яка виконує математичні операції на дискретизованому сигналі дискретного часу для зменшення або посилення певних аспектів цього сигналу, чим відрізняється від аналогового фільтра.

Цифрова система фільтрів зазвичай складається з аналого-цифрового перетворювача (АЦП) для вибірки вхідного сигналу, а потім мікропроцесора та деяких периферійних компонентів, таких як пам'ять для зберігання даних та коефіцієнтів фільтра тощо. Нарешті, цифро-аналоговий перетворювач для завершення вихідного етапу. Інструкції програми (програмне забезпечення), що працює на мікропроцесорі, реалізують цифровий фільтр, виконуючи необхідні математичні операції над числами, отриманими від АЦП. У деяких додатках з високою продуктивністю FPGA або ASIC використовується замість мікропроцесора загального призначення або спеціалізованого цифрового сигнального процесора (DSP) із специфічною паралельною архітектурою для прискорення операцій, таких як фільтрація.

Цифрові фільтри можуть бути дорожчими за аналогічний аналоговий фільтр через їх підвищену складність, але вони роблять практичними багато конструкцій, які непрактичні або неможливі як аналогові фільтри. Цифрові фільтри часто можуть бути виконані дуже високим порядком і часто є фільтрами з кінцевим імпульсним відгуком, що дозволяє отримати лінійний фазовий відгук. При використанні в контексті аналогових систем у режимі реального часу цифрові фільтри іноді мають проблематичну затримку (різниця у часі між входом та відповіддю) через пов'язані з ними аналого-

цифрові та цифро-аналогові перетворення або через інші затримки в їх реалізації.

Цифровий фільтр характеризується його передавальною функцією або, що еквівалентно, його різницеvim рівнянням. Математичний аналіз функції передачі може описати, як вона буде реагувати на будь-який вхід. Таким чином, проектування фільтра складається з розробки специфікацій, відповідних даних проблеми (наприклад, фільтр низького проходу другого порядку з певною частотою відсічення), а потім вироблення функції передачі, яка відповідає специфікаціям.

Передавальна функція для лінійного, інваріантного цифровим фільтром можна виразити як функцію передачі в  $Z$ -області; якщо він є причинним, то він має форму:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_M z^{-M}}, \quad (2.6)$$

де порядок фільтра більший від  $N$  або  $M$ .

Це форма для рекурсивного фільтра, який, як правило, призводить до нескінченної поведінки імпульсної реакції ІР, але якщо знаменник дорівнює одиниці, тобто немає зворотного зв'язку, то це стає фільтром FIR або кінцевим імпульсним фільтром.

Для аналізу поведінки даного цифрового фільтра можуть використовуватися різні математичні методи. Багато з цих методів аналізу також можуть бути використані в конструкціях і часто складають основу специфікації фільтра.

Як правило, можна характеризувати фільтри, обчислюючи, як вони будуть реагувати на простий вхід, наприклад імпульс. Потім можна розширити цю інформацію для обчислення реакції фільтра на більш складні сигнали.

*Імпульсна відповідь*, часто позначається  $h[k]$ , є вимірюванням того, як фільтр буде реагувати на функцію дельти Кронекера. Наприклад, задавши

рівняння різниці, встановимо  $x_0 = 1$  і  $x_k = 0$  для  $k \neq 0$  і оцінимо. *Імпульсна відповідь* – це характеристика поведінки фільтра. Цифрові фільтри, як правило, розглядаються у двох категоріях: нескінченний імпульсний відгук (IIR) та кінцевий імпульсний відгук (FIR). У випадку лінійних фільтрів FIR, що інваріантні з часом, імпульсна характеристика точно дорівнює послідовності коефіцієнтів фільтра:

$$y_n = \sum_{k=0}^N h_k x_{n-k} \quad (2.7)$$

З іншого боку, фільтри IIR є рекурсивними, вихід залежить від поточних та попередніх входів, а також попередніх виходів. Таким чином, загальна форма фільтра IIR є:

$$\sum_{m=0}^M a_m y_{n-m} = \sum_{k=0}^N b_k x_{n-k} \quad (2.8)$$

Позначення імпульсної реакції виявить, як фільтр реагуватиме на раптові, миттєві порушення. Фільтр IIR завжди буде рекурсивним. Незважаючи на те, що для рекурсивного фільтра можливий кінцевий імпульсний відгук, нерекурсивні фільтри завжди матимуть кінцеву імпульсну характеристику. Прикладом може слугувати фільтр ковзної середньої (МА), який може бути реалізований як рекурсивно, так і нерекурсивно.

У системах дискретного часу цифровий фільтр часто реалізується шляхом перетворення функції передачі в лінійне рівняння різниці постійних коефіцієнтів (LCCD) через Z-перетворення. Дискретна функція передачі частотної області записується як відношення двох многочленів. Наприклад:

$$H(z) = \frac{(z+1)^2}{(z-\frac{1}{2})(z+\frac{3}{4})} \quad (2.9)$$

З цього випливає:

$$H(z) = \frac{z^2 + 2z + 1}{z^2 + \frac{1}{4}z - \frac{3}{8}} \quad (2.10)$$

Щоб зробити відповідний фільтр причинним, чисельник і знаменник діляться на найвищий порядок  $z$ :

$$H(z) = \frac{1 + 2z^{-1} + z^{-2}}{1 + \frac{1}{4}z^{-1} - \frac{3}{8}z^{-2}} = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (2.11)$$

Коефіцієнти знаменника  $a_k$  – це коефіцієнти "зворотного руху" назад, а коефіцієнти чисельника – коефіцієнти "подачі вперед",  $b_k$ . Отримане лінійне різницеве рівняння дорівнює:

$$y[n] = -\sum_{k=1}^M a_k y[n-k] + \sum_{k=0}^N b_k x[n-k] \quad (2.12)$$

або, для прикладу вище:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1 + 2z^{-1} + z^{-2}}{1 + \frac{1}{4}z^{-1} - \frac{3}{8}z^{-2}} \quad (2.13)$$

З умови перестановки:

$$\Rightarrow (1 + \frac{1}{4}z^{-1} - \frac{3}{8}z^{-2})Y(z) = (1 + 2z^{-1} + z^{-2})X(z) \quad (2.14)$$

то приймаючи зворотне  $z$ -перетворення:

$$\Rightarrow y[n] + \frac{1}{4}y[n-1] - \frac{3}{8}y[n-2] = x[n] + 2x[n-1] + x[n-2] \quad (2.15)$$

і нарешті, вирішивши для  $y[n]$ :

$$y[n] = -\frac{1}{4}y[n-1] + \frac{3}{8}y[n-2] + x[n] + 2x[n-1] + x[n-2] \quad (2.16)$$

Це рівняння показує, як обчислити наступний зразок виводу  $y[n]$ , з точки зору минулих результатів,  $y[n-p]$ , теперішній вхід,  $x[n]$  та минулі входи,  $x[n-p]$ . Застосування фільтра до вводу в цій формі еквівалентно реалізації прямої форми I або II залежно від точного порядку оцінки.

Простими словами, наприклад, як використовується комп'ютерним програмістом, що реалізує вищевказане рівняння в коді, його можна описати так:

$y$  = вихідне або відфільтроване значення



$x$  = вхідне або вхідне неочищене значення

$n$  = номер вибірки, номер ітерації або номер періоду часу

і тому:

$y[n]$  = поточне відфільтроване (вихідне) значення

$y[n - 1]$  = останнє відфільтроване (вихідне) значення

$y[n - 2]$  = значення від 2 до останнього відфільтрованого (вихідного)

$x[n]$  = поточне вхідне значення

$x[n - 1]$  = останнє вхідне значення

$x[n - 2]$  = 2-е-останнє вхідне значення

### *Реалізація цифрового фільтра*

Після розробки фільтра він повинен бути реалізований шляхом розробки схеми потоку сигналу, яка описує фільтр з точки зору операцій на вибірках послідовностей.

Дана функція передачі може бути реалізована багатьма способами. Поміркуйте, як можна оцінити простий вираз, такий як  $ax + bx + c$  можна також обчислити еквівалентно  $x(a + b) + c$ . Таким же чином всі реалізації можуть розглядатися як "факторизація" однієї і тієї ж функції передачі, але різні реалізації матимуть різні числові властивості. Зокрема, деякі реалізації є більш ефективними щодо кількості операцій або елементів зберігання, необхідних для їх здійснення, а інші забезпечують такі переваги, як поліпшена чисельна стабільність та зменшена помилка округлення. Деякі структури краще для арифметики з фіксованою точкою, а інші можуть бути кращими для арифметики з плаваючою комою.

### *Пряма форма I*

Прямий підхід для реалізації фільтра IIR – це пряма форма I, де рівняння різниці оцінюється безпосередньо. Ця форма є практичною для невеликих фільтрів, але може бути неефективною та непрактичною (чисельно нестабільною) для складних конструкцій. Взагалі для цієї форми

потрібні  $2N$  елементи затримки (і для вхідних, і для вихідних сигналів) для фільтра порядку  $N$ .

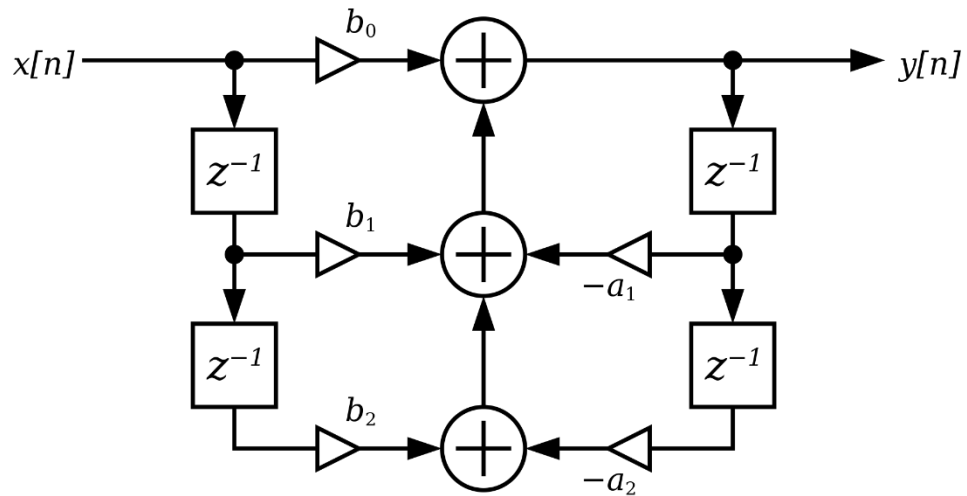


Рисунок 2.11. Блок-схема цифрового фільтра реалізованого прямою формою I

### Пряма форма II

Альтернативна пряма форма II потребує лише  $N$  одиниць затримки, де  $N$  – це порядок фільтра – потенційно вдвічі більше, ніж пряма форма I. Ця структура отримується шляхом зміни порядку розділів чисельника та знаменника прямої форми I, оскільки вони насправді є двома лінійними системами, і застосовується властивість комутативності. Тоді ви помітите, що є два стовпці затримок ( $z^{-1}$ ), які відключають центральну мережу, і їх можна комбінувати, оскільки вони є надлишковими, даючи реалізацію як показано нижче.

Недоліком є те, що пряма форма II збільшує можливість арифметичного переповнення для фільтрів високого  $Q$  або резонансу. Показано, що зі збільшенням  $Q$  шум округлості обох топологій прямої форми збільшується без меж. Це тому, що, концептуально, сигнал спочатку передається через всеполосний фільтр (який, як правило, збільшує коефіцієнт посилення на резонансних частотах) до того, як результат буде насичений, потім проходить через фільтр, що повністю нульовий (що часто ослаблює багато чого всеполосна половина посилюється).

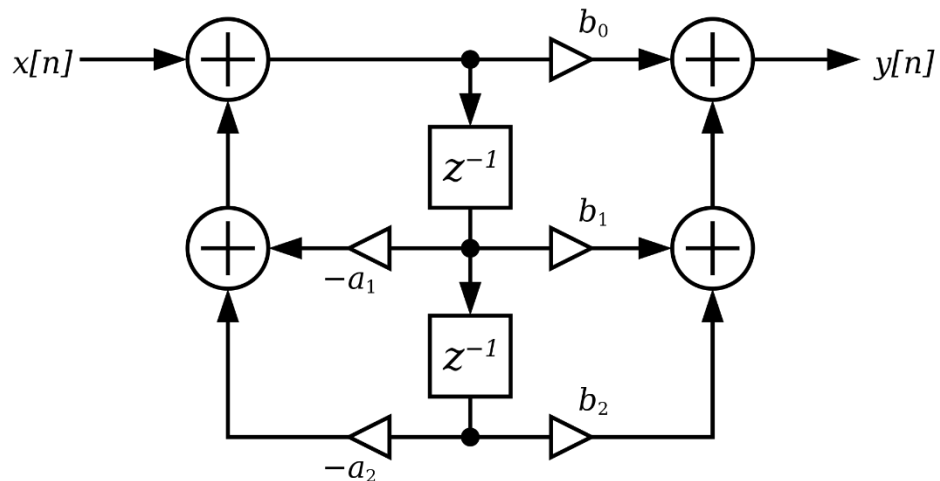


Рисунок 2.12. Блок-схема цифрового фільтру реалізованого прямою формою II

### *Каскадні секції другого порядку*

Загальна стратегія полягає у реалізації цифрового фільтра вищого порядку (більше ніж 2) у вигляді каскадної серії "біквadratних" (або "двоквадратних") секцій другого порядку. Перевагою цієї стратегії є те, що діапазон коефіцієнтів обмежений. Каскадні прямі розділи II форми приводять до  $N$  елементів затримки для фільтрів порядку  $N$ . Каскадні прямі форми I розділів призводять до  $N + 2$  елементів затримки, оскільки елементи затримки вводу будь-якої секції (крім першого розділу) є надмірними із затримкою елементи виходу попереднього розділу.

### *Порівняння аналогових та цифрових фільтрів*

Цифрові фільтри не підлягають нелінійності компонентів, які значно ускладнюють конструкцію аналогових фільтрів. Аналогові фільтри складаються з недосконалих електронних компонентів, значення яких задано до граничного допуску (наприклад, значення резисторів часто мають допуск  $\pm 5\%$ ), які також можуть змінюватися з плином температури і дрейфувати з часом. Із збільшенням порядку аналогового фільтра, а отже, і його кількості компонентів, ефект помилок змінних компонентів значно збільшується. У цифрових фільтрах значення коефіцієнтів зберігаються в пам'яті комп'ютера, що робить їх набагато більш стабільними та передбачуваними.

Оскільки коефіцієнти цифрових фільтрів визначені, їх можна використовувати для досягнення набагато складніших та вибіркових конструкцій – конкретно за допомогою цифрових фільтрів можна досягти меншої пульсації пропускнуої смуги, швидшого переходу та більшого ослаблення зупинки, ніж це стосується аналогічних фільтрів. Навіть якщо дизайну вдасться досягти за допомогою аналогових фільтрів, інженерна вартість проектування еквівалентного цифрового фільтра, ймовірно, буде значно нижчою. Крім того, можна легко змінити коефіцієнти цифрового фільтра, щоб зробити адаптивний фільтр або параметричний фільтр, керований користувачем. Хоча ці методи можливі і в аналоговому фільтрі, вони знову значно складніше.

Цифрові фільтри можуть бути використані при розробці фільтрів кінцевих імпульсних характеристик. Еквівалентні аналогові фільтри часто складніші, оскільки для цього потрібні елементи затримки.

Цифрові фільтри менше покладаються на аналогові схеми, потенційно дозволяючи покращити співвідношення сигнал-шум. Цифровий фільтр подаватиме сигнал до сигналу під час аналогового низькочастотного фільтрування, аналогового до цифрового перетворення, цифрового до аналогового перетворення та може вводити цифровий шум завдяки квантуванню. З аналоговими фільтрами кожен компонент є джерелом теплового шуму (наприклад, шум Джонсона), тому з підвищенням складності фільтра зростає і шум.

Однак цифрові фільтри вводять більш високу фундаментальну затримку в системі. У аналоговому фільтрі затримка часто незначна; строго кажучи, настав час поширення електричного сигналу по ланцюгу фільтра. У цифрових системах затримка вводиться елементами затримки на шляху цифрового сигналу та аналого-цифровими та цифро-аналоговими перетворювачами, які дають змогу системі обробляти аналогові сигнали.

У дуже простих випадках використання аналогового фільтра вигідніше. Впровадження цифрового фільтра вимагає значної схеми накладних витрат,

як обговорювалося раніше, включаючи два аналогових фільтри низьких частот.

Ще одна перевага аналогових фільтрів – це низьке споживання енергії. Аналогові фільтри вимагають значно меншої потужності, тому вони є єдиним рішенням, коли вимоги до енергії є жорсткими.

Під час створення електричної ланцюга на друкованій платі, як правило, простіше використовувати цифрове рішення, оскільки оброблювальні пристрої роками оптимізовані. Створення однієї схеми з аналоговими компонентами займає набагато більше місця при використанні дискретних компонентів. Дві альтернативи – це FPAА та ASIC, але вони є дорогими в невеликих кількостях.

#### 2.4. Синтез алгоритму роботи системи

Якість систем обробки сигналів, таких як програмно визначене радіо або модем зв'язку, залежить від продуктивності обраної апаратної платформи. Ранні розробки дизайну дозволяють дизайнеру отримати уявлення про проблеми впровадження, архітектурні рішення для підвищення продуктивності та потужності, а також апаратне / програмне розділення до появи рівня реєстрації-передачі (RTL) та програмного забезпечення.

Крім того, ранні розробки дизайну допомагають архітектурним дизайнерським рішенням, що полегшують планування сучасних та майбутніх вимог. Дизайнери можуть далі розширити розробки конструкцій для проведення аналізу несправностей та виявлення тестових випадків для перевірки.

Більшість складних систем, таких як просунуті високошвидкісні платформи обробки сигналу, проходять через дорогі дизайнерські ітерації. Понад 70% ітерацій часу обумовлено неправильними дизайнерськими рішеннями або непорозумінням вимог. Крім того, на такі складні системи впливають численні фактори. Деякі з них – це низька затримка обробки, мала потужність, конфігурація та обмеження ресурсів. Ранні розробки дизайну допомагають подолати подібні проблеми.

Розробники дотримуються низки способів проведення досліджень та аналізу дизайну. Хоча аналітичні методи дають значну інформацію про найгірший час виконання, більшість діапазону не зустрічаються в реальному житті. Методи фізичного тестування можуть надавати точну інформацію, але не є можливими для складних систем, таких як SDR або високошвидкісні комунікаційні модеми.

Дискретна імітація подій дозволяє архітекторам оцінювати цільову систему із сотнями чи тисячами випадків використання, плануванням завдань та конфігураціями системи у більш короткі часові рамки. Дискретне моделювання подій та моделювання допомагає не тільки в побудові надзвичайно складних моделюючих моделей, але й дозволяє архітекторам та дизайнерам управляти великим набором випадків використання та ймовірностей.

Крім того, наявність заздалегідь побудованих та затверджених бібліотек апаратних архітектурних компонентів та рамок допомагає моделювати архітектуру програмного забезпечення. Вони підвищують точність системної моделі та скорочують час на побудову моделюючих моделей.

Такий підхід дозволяє розробнику:

- Зосередитися на аналізі та інтерпретації результатів, а не на побудові моделей.
- Оптимізувати архітектуру продуктів, запустивши моделювання за допомогою профілів додатків для вивчення вибору платформи; апаратні та програмні рішення; периферійні пристрої проти продуктивності; та розповсюдження програмних потоків на цільових архітектурах.

Моделі, побудовані графічно за допомогою попередньо вбудованих налаштованих бібліотек VisualSim Architect. Процесори, пам'ять, ресурси FPGA, шини та взаємозв'язки моделюються за допомогою бібліотечних

блоків VisualSim “SystemResource”. Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) моделюються як генератори трафіку і відповідають за генерацію цифрових зразків на 5 МГц.

У цьому дослідженні системи розглянуто абстрактні деталі для кожної функції. Деталі можна використовувати для створення детальної моделі, інтегруючи модулі matlab / simulink / C / C ++. Для кожної функції ми розглянули значення часу з існуючого коду Verilog, що працює в системному генераторі, і стандартних опублікованих значень. Сума зважених входів передається цифровому сигнальному процесору для обробки дисплея та FFT з плаваючою точкою, після чого дані записуються в буфер кадру для відображення.

Блок-схема запропонованої системної платформи показана в додатку 1.

## Висновки до розділу

У даному розділі розглянуто показники приймачів радіосигналів, проведено порівняльну характеристику аналогових та цифрових фільтрів, представлено методологію моделювання та моделювання на рівні системи для архітектури платформи обробки сигналів для програмно визначених радіостанцій на основі алгоритму аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворення, синтезовано абстрактну систему цифрової фільтрації та обробки сигналів.

## РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНА ТА АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИНТЕЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

### 3.1. Оптимізація програмного забезпечення синтезованої системи

Процес оптимізації рівня потоків даних, графіків та акторів та пов'язані з ними ітерації дизайну, як показано в додатку. 1 блоками, позначеними Представлення потоку даних, реалізація LIDE-C та оптимізована реалізація LIDE-C. Ми починаємо з реалізації графіка потоку даних, отриманої з використанням LIDE-C, яка забезпечує реалізацію API LWDF на мові C, щоб структури, що базуються на CFDF, та графіки потоків даних могли бути реалізовані структуровано, використовуючи C. Початкова (послідовна) конструкція LIDE-C розроблена на етапі проектування, що відповідає блоку, позначеному Впровадження LIDE-C.

Після перевірки правильності роботи на основі потоку даних для початкової реалізації графіка потоку даних DNN в LIDE-C проводяться експерименти з різними перетвореннями на рівнях актора, підграфа та потоку даних. Тут використовується ортогональність реалізації актора, ребер та графіків у LIDE-C, що дозволяє дизайнерам гнучко та ефективно виконувати експерименти з найрізноманітнішими перетвореннями та з різними комбінаціями застосованих перетворень. Проведені тут трансформації на рівні актора зосереджені на методах оптимізації, застосованих до актора згортки, що є головним вузьким місцем у дизайні. Перетворення рівня підграфа включають оптимізацію управління пам'яттю, що проводиться на FIFO як усередині кожного підграфу (шару DNN), так і між парами сусідніх шарів.

Розглянемо, наприклад, витрати на буферну пам'ять (витрати на зберігання, пов'язані з кінцями графіка потоку даних) для DNN. У нашій реалізації LIDE-C другий згортковий шар потребує найбільшої буферної пам'яті. У цьому шарі кожна з 32 гілок складається з 32 акторів згортки, 31 акторів додавання та одного актора, які виконують як максуплінг, так і ReLU



(випрямлений лінійний блок). Зважаючи на те, що розмір карти вхідних даних, обробленої кожною гілкою, становить  $48 \times 48$  пікселів, буферна пам'ять, необхідна для спілкування актора всередині кожної гілки, становить  $48 \times 48 \times (32 + 1) = 76,032$  пікселів. Таким чином, загальна буферна пам'ять всередині другого згорткового шару є  $76,032 \times 32 = 2,433,024$  пікселів. Буферна пам'ять, необхідна для зв'язку даних між першим і другим шаром, може бути обчислена як  $48 \times 48 \times 32 = 73,728$  пікселів.

Впроваджена техніка оптимізації буферної пам'яті, яка корисна для впровадження DNN з обмеженими ресурсами. Зокрема, включено нову реалізацію абстрактних типів даних FIFO (ADT) у LIDE-C, що називається спільним FIFO, що дозволяє реалізувати декілька країв потоку даних у графіку через екземпляри ADT FIFO, які мають однакову область пам'яті. Такий обмін буфером у реалізаціях потоків даних досліджувався в різних формах для різних контекстів автоматизованого планування та синтезу програмного забезпечення. Це спрощує системному дизайнеру явно застосовувати спільний доступ до буфера в межах її реалізації або його реалізації, а не залежно від її неявної підтримки через набір інструментів, який використовується.

Знову ж таки, використовуючи ортогональність між компонентами потоку даних, обмін буферами виконується лише на цільових краях потоку даних і не потребує змін до інших дійових осіб або підграфів. Завдяки підтримці такого поділу проблем у LIDE-C різні реалізації ADT для FIFO або групи FIFO можуть бути змінені, не впливаючи на загальну функціональність системи.

У такому застосуванні LIDE-C DNN є три ключові аспекти застосування спільних FIFO. По-перше, на вході кожного згорткового шару  $L$  вхідні дані з попереднього шару зберігаються централізовано, а не копіюються окремо в кожен гілку  $L$ . По-друге, ребра в різних шари мають однакову пам'ять, так що пам'ять мультиплексована поділом часу між шарами – обробка даного шару перезаписує пам'ять у спільних FIFO, не

вводячи конфліктів, які впливають на результати обчислень. По-третє, актори працюють над даними зі спільних вхідних FIFO безпосередньо через свої покажчики читання у FIFO (а не спочатку копіюють дані локально у внутрішній пам'яті актора).

Процес профілювання програмного забезпечення у контексті оптимізованої реалізації LIDE-C архітектури DNN. Платформа реалізації – це Intel i7-2600K, що працює на частоті 3,4 ГГц. Табл. 3.1 показує вимірювання програмного забезпечення на рівні шарів та на рівні актора відповідно.

Таблиця 3.1 Профілювання програмного забезпечення на рівні акторського рівня

Шар	1	2	3	4	5	Загально
T [ms]	18.71	22.08	0.0149	0.0034	0.0036	40.812
T%	45.84	54.10	0.04	0.01	0.01	100

Тут рядок, позначений "T", дає час виконання кожного шару, а рядок, позначений "T%", дає відсоток від загального часу виконання DNN, який присвоюється кожному шару.

Програмування програмного забезпечення на рівні шару та актора забезпечує розуміння складності обробки суб'єктів у кожному шарі. Відповідно до табл. 3.1, на згорнуті шари припадає 99,94% часу на виконання системи. Крім того, час виконання рівня 2 дуже близький до строку 1.

### 3.2. Пропозиції щодо технічної реалізації синтезованої системи на новітній елементній базі

Розглянемо апаратний процес проектування за допомогою апаратного прискорювача. Прискорювач забезпечує підсистему для виготовлення функціональних карт з першого згорткового шару програми DNN, що більш відома як підсистема для карт функцій (SFM).

Завдяки послідовності взаємозв'язку, яка підтримується в різних реалізаторах LIDE-акторів на різних мовах, можна легко перетворити реалізацію підсистеми SMF на основі LIDE-C в апаратну, замінивши кожного програмного забезпечення на апаратний модуль, розроблений в LIDE-V, і шляхом підключення похідні суб'єкти обладнання з FIFO LIDE-V. Дотримуючись загального підходу до реалізації апаратних засобів LIDE в апаратному забезпеченні, кожна реалізація акторів LIDE-V розкладається на АЕМ та АІМ. АЕМ підлягає багаторазовому застосуванню серед різних суб'єктів у нашій реалізації, хоча загалом може бути корисним спеціалізовані впровадження АЕМ, які упорядковуються для конкретних потреб окремих суб'єктів.

Забезпечення обладнання відрізняється від дизайну LIDE-C двома основними способами. По-перше, вхідні дані подаються у переплетеному форматі, зменшуючи складність апаратного інтерфейсу та драйверного програмного забезпечення, оскільки для управління є лише один вхідний FIFO. По-друге, апаратні суб'єкти призначені для створення одного ряду за кожен стрілець замість цілих зображень. Це зменшує вимоги до розміру FIFO у першому шарі з  $96 \times 96$  пікселів до лише 96 пікселів. Апаратні суб'єкти в нашій реалізації плануються за допомогою повністю розподіленого підходу.

Отриманий SMF показаний на додатку 2. Впроваджене обладнання перевіряється на основі опорних виходів, витягнутих з реалізації LIDE-C. На цьому малюнку ставки виробництва та споживання (швидкості потоку даних) ануються поруч із портами актора, а  $w$  – ширина вхідного зображення. Актор згортки має кілька режимів роботи (режими CFDF) з різними витратами споживання.

Ми використовуємо апаратне профілювання в STMCM для отримання даних про час виконання, які згодом використовуються для керівництва процесом ітеративної оптимізації дизайну. У цьому розділі ми демонструємо апаратне профілювання в контексті нашої програми DNN. Профілювання

проводиться за допомогою цільової платформи, яка в нашій демонстрації – це Zynq Z-7020 SoC. Ми аналізуємо реалізацію LIDE-C на ARM A9 MPCores, що надається цільовою платформою, і розробляємо реалізацію першої версії SFM на цій платформі та витягуємо дані часу виконання з цієї реалізації.

Табл.3.2 зображує різні дані, пов’язані з часом виконання та часом очікування апаратного прискорювача SFM. Тут символ  $t_{tot}$  являє собою загальний час, необхідний для виконання SFM;  $T_{ic}$  – середній проміжок часу між викликом актора та відповідним його завершенням;  $T_{ci}$  – середній проміжок часу, який актор повинен чекати, щоб його звільнили після попереднього завершення стрільби; стрілянина – кількість стрілянь даного актора під час виконання SFM;  $T_{ot}$ , обчислений як  $(T_{ic}) \times (\text{стрілянина})$ , дає загальний час виконання даного актора під час виконання SFM  $T_{ii} = (T_{ic} + T_{ci})$  позначає середній проміжок часу між початком однієї виклику до початку наступного; а співвідношення  $T_{ii}/T_{ic}$  вимірює ступінь неробства актора.

Таблиця 3.2. Вимірювані дані, пов’язані з часом виконання актора та часом очікування.

<b><i>SFM <math>t_{tot}</math></i></b>	<b>232,831</b>				
	<b><i><math>T_{ic}</math></i></b>	<b><i><math>T_{ci}</math></i></b>	<b><i>firings</i></b>	<b><i>Tot (Tot%)</i></b>	<b><i><math>T_{ii}/T_{ic}</math></i></b>
<b><i>Знешкоджені</i></b>	3	2	9216	27,648 (11.87)	1.67
<b><i>Звиті</i></b>	2402	2	96	230,592 (99.04)	1.00
<b><i>Сума</i></b>	107	2297	96	10,272 (4.41)	22.46
<b><i>Maxpool&amp;ReLU</i></b>	195	4613	48	9360 (4.02)	24.66

Ця багата колекція показників, яка підтримується базовим обчисленням CFDF, надає різні відомості про системну архітектуру на основі потоку даних та її реалізацію. Наприклад, співвідношення  $T_{ii}/T_{ic}$  забезпечує розуміння відмінностей у швидкості обробки, які корисні для використання властивості асинхронії між суб'єктами потоку даних.

На основі аналізу результатів нашого апаратного профілювання (табл. 3.2.) ми можемо отримати різні версії апаратного прискорювача SFM з різними компромісами серед енергоспоживання, пропускної здатності системи та вартості апаратних ресурсів. По-перше, дивлячись на стовпчик Tot%, ми бачимо, що всі суб'єкти, крім Convolution, неактивні протягом більшої частини часу виконання. Максимальна частка активного часу серед цих акторів – 11,87%, досягнута Deinterleave. Постановка годин цих неактивних суб'єктів може забезпечити більш енергоефективну роботу прискорювача, усуваючи динамічне споживання електроенергії під час простою.

Крім того, суб'єкти Deinterleave та Convolution мають відносно невеликі рівні холостого ходу ( $T_{ii} / T_{ic}$ ), час очікування  $T_{ci}$  дорівнює двом тактовим циклам для обох. З іншого боку, Sum і Maxpool & ReLU демонструють набагато більші терміни очікування та простої. Важливий натяк, що впливає із значень  $T_{ci}$ , полягає в тому, що завдяки властивій асинхронії акторів потоку даних можна розділити конструкцію на різні тактові області, що працюють на різних частотах, таким чином отримуючи дизайн GALS. Зокрема, суб'єкти Deinterleave та Convolution можуть бути розміщені в одній годинниковій області (Регіон 1), керується годинником 1, тоді як Sum та Maxpool & ReLU можуть бути розміщені в іншому регіоні, керованим лічильником 2. На основі значення  $T_{ii} / T_{ic}$ , ми можемо встановити тактову частоту 2 в 20 разів повільніше, ніж тактова 1.

Більше того, підграф, включений, може бути інкапсульований в ієрархічну дію. Цей актор, побачений ззовні, як і будь-який інший актор LIDE-V. Актор та його інкапсульована підсистема можуть мати тактовий годинник або тактовувати з різною частотою, надаючи додаткові рішення для оптимізації прискорювача SFM.

*Спільне впровадження та оптимізація апаратного / програмного забезпечення*

Запропонований проектний потік забезпечує різноманітні варіанти здійснення спільного проектування обладнання та програмного забезпечення та можливості оптимізації. Для даної моделі високого рівня LWDF взаємодія між програмним забезпеченням та апаратними засобами суб'єктами або підграфів можна формувати та вдосконалювати залежно від конкретних обмежень та вимог програми.

Зокрема, продемонстровано два основні аспекти впровадження, які можна ефективно дослідити за допомогою синтезованої методології: паралелізм у виконанні акторів та прийнятий інтерфейс комунікації. Ступінь паралелізму може бути налаштований залежно від кількості програмних або апаратних ядер, прийнятих для виконання певного обчислювального кроку, тоді як різні комунікаційні інтерфейси дозволяють мати різний рівень зв'язку між апаратними та програмними суб'єктами. Отже, ці аспекти для розвідки є важливими джерелами компромісів, які слід враховувати в процесі впровадження.

З метою розробок, додаток DNN розбито на дві частини для виконання відповідно програмного забезпечення (ПС) та обладнання (PL). Тут PS і PL розшифровуються відповідно до системи обробки та програмованої логіки. У експериментах розглянуто підсистему SFM, частину додатку DNN, який буде прискорений в PL, а решту, що включає другий згортковий шар, два щільних шару та остаточний рівень класифікації, виконуватиме PS.

Зауважимо, що перший згортковий шар є лише одним з основних обчислювально інтенсивних кроків застосування DNN. Відповідно до результатів профілювання програмного забезпечення, заснованих на платформі SoC, що застосувалася для спільного проектування обладнання та програмного забезпечення, на перший згортковий шар припадає лише 27% часу прогнозування. З цієї причини прискорення, що приводиться за допомогою апаратного прискорення до загальної програми DNN, не є драматичним. Однак результати конкретно демонструють, як STMCM можна застосувати для виконання широкого дизайнерського дослідження космосу у

різних розробки для досягнення підвищення продуктивності системи при сильно обмеженій доступності апаратних ресурсів.

Прискорювач SFM інтегровано в конструкцію LIDE-C, замінивши реалізацію програмного забезпечення SFM функціональними викликами драйверного програмного забезпечення, здатного вивантажити обчислення на PL. Ми експериментували з використанням драйвера ядра Linux на основі фреймворку вводу / виводу (UIO) користувача користувача та драйвера, який не залежить від ядра Linux і працює за допомогою прямого доступу до пам'яті за допомогою системного виклику mmap. Підхід UIO більше підходить для використання у виробництві, тоді як mmap добре працює для складання прототипів, і цей останній підхід використано у цій роботі для оцінки. PS і PL можуть спілкуватися за допомогою інтерфейсів AXI, що використовують порти загального призначення (GP); 32-розрядні порти PS або ведучий порт з пропускнуою здатністю 600 Мбіт / с для каналів читання і запису; Порти високої продуктивності (порти HP) або порти когерентності прискорювача (ACP); і 64-бітові ведені порти PS з шириною смуги 1200 Мбіт / с для каналів читання і запису.

На рис. 3.1 зображена контрольна конфігурація для спільних розробок. Для інтеграції прискорювача в SoC необхідно забезпечити загальну AXI обгортку для апаратних підграфів потоку даних. Обгортка відповідає прийнятому інтерфейсу AXI і дозволяє програмісту отримувати доступ до вхідних та вихідних FIFO графіків потоку даних та стежити за їх популяцією. Для цього обгортка включає всю необхідну логіку для управління зв'язком.

У такому підході до апаратного прискорення відображено підсистему SFM на апаратне забезпечення. Ця підсистема створює карту зображень розміром 48x48 для кожного виконання. Таким чином, для виконання всього першого згорткового шару додатку DNN, який повинен створити 32 карти розмірами 48x48, прискорювач SFM повинен бути виконаний 32 рази з відповідними коефіцієнтами згортки. Для кожного з цих виконань SFM PS передасть відповідні коефіцієнти згортки на прискорювач. Вхідне

зображення, яке залишається однаковим для всіх 32 виконання, надсилається лише один раз з PS та зберігається в локальному буфері в межах прискорювача. Усі 32 виконання SFM мають доступ до вхідного зображення з цього локального буфера. Таким чином ми уникаємо великої кількості передачі даних, яка була б необхідною, якби вхідне зображення довелося надсилати окремо від PS до PL для кожного виконання SFM. Після завершення кожного виконання SFM PS отримує отриману карту функції з прискорювача.

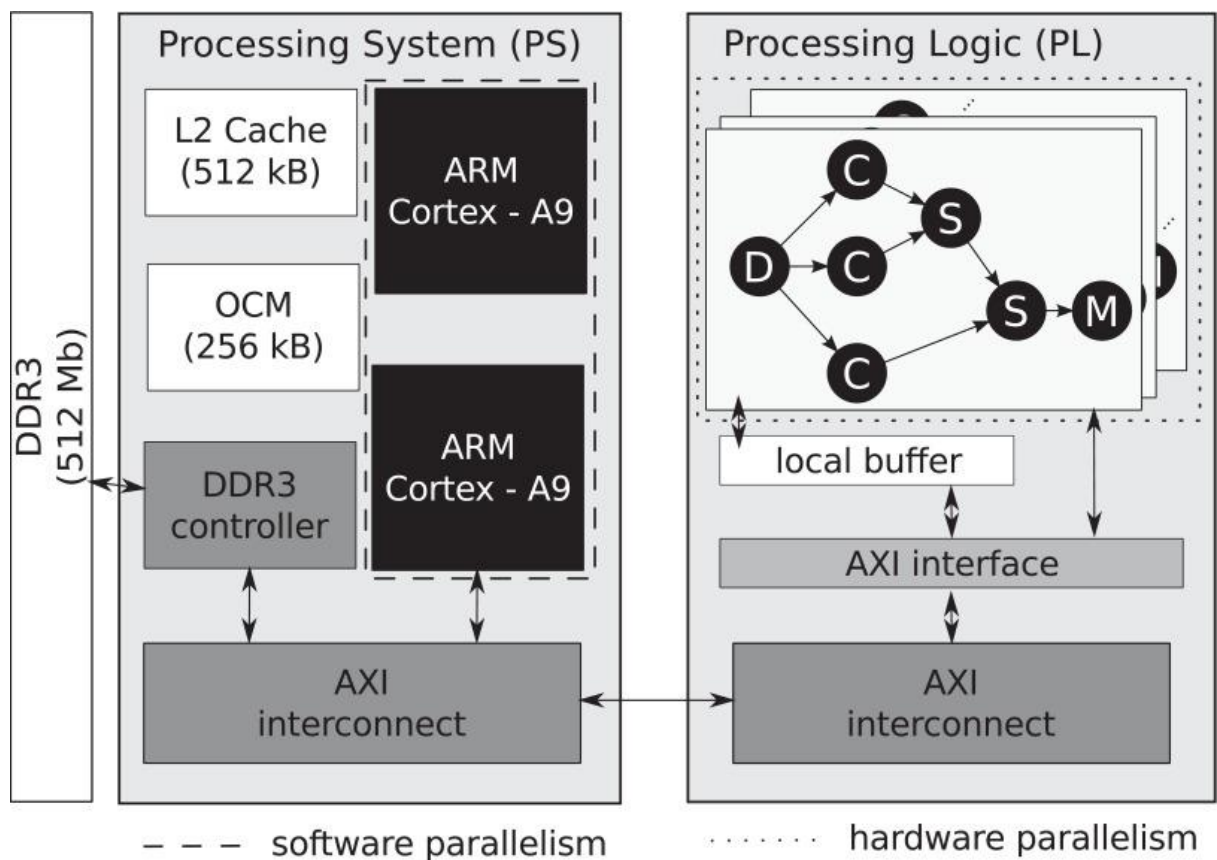


Рисунок 3.1. Довідкова конфігурація для розробки спільного проектування обладнання та програмного забезпечення.

У решті детально обговорено три різні набори реалізації та оптимізації спільного проектування, які сприяють такій методології:

- кількість паралелізму, що експлуатується в програмних та апаратних підсистемах;



- два альтернативних комунікаційних інтерфейси, які пропонують різні компроміси з точки зору потреб у ресурсах та швидкості виконання; і
- локальне буферування для уникнення надмірної передачі загальних даних по різних гілках прискорювача SFM

Дискретна імітація подій дозволяє дизайнерам та архітекторам оцінювати цільову систему із сотнями чи тисячами випадків використання, плануванням завдань та конфігураціями системи у більш короткі часові рамки. Дискретне моделювання подій та моделювання допомагає не тільки в побудові надзвичайно складних моделюючих моделей, але й дозволяє архітекторам та дизайнерам управляти великим набором випадків використання та ймовірностей.

Крім того, наявність заздалегідь побудованих та затверджених бібліотек апаратних архітектурних компонентів та рамок допомагає моделювати архітектуру програмного забезпечення. Вони підвищують точність системної моделі та скорочують час на побудову моделюючих моделей.

Такий підхід дозволяє розробнику:

- Зосередитися на аналізі та інтерпретації результатів, а не на побудові моделей.
- Оптимізувати архітектуру продуктів, запустивши моделювання за допомогою профілів додатків для вивчення вибору платформи; апаратні та програмні рішення; периферійні пристрої проти продуктивності; та розповсюдження програмних потоків на цільових архітектурах.

Метою розробки дизайну є зйомка затримки обробки даних, вимог до буфера програмного забезпечення (FPGA), програмованого на полях впливу довжини пакету на продуктивність та ідентифікації конфігурацій апаратних платформ. Дослідження можуть бути розширені, щоб зрозуміти

використання ресурсів для кожної функції обробки сигналів, такі як знаходження піків, корелятор, зважене множення та акумулятор.

Модель імітації дискретних подій використовує такі компоненти:

- Чотири канали АЦП на 5 МГц.
- Довжина пакета 512 та 1024 байт.
- FIFO на 233 МГц.
- Буфер з глибиною 1024.
- Початкова швидкість тактової частоти FPGA - 125 МГц. Швидкість тактової частоти FPGA можна змінювати, щоб відповідати вимогам затримки.
- Зовнішня пам'ять DDR, що працює на частоті 167 МГц.
- ADSP TS201 працює на 260 МГц.

Моделі побудовані графічно за допомогою попередньо вбудованих налаштованих бібліотек VisualSim Architect. Процесори, пам'ять, ресурси FPGA, шини та взаємозв'язки моделюються за допомогою бібліотечних блоків VisualSim “SystemResource”. Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) моделюються як генератори трафіку і відповідають за генерацію цифрових зразків на 5 МГц.

У цьому дослідженні системи ми розглянули абстрактні деталі для кожної функції. Деталі можна використовувати для створення детальної моделі, інтегруючи модулі matlab / simulink / C / C ++. Для кожної функції ми розглянули значення часу з існуючого коду Verilog, що працює в системному генераторі, і стандартних опублікованих значень. Сума зважених входів передається цифровому сигнальному процесору для обробки дисплея та FFT з плаваючою точкою, після чого дані записуються у буфер кадру для відображення.

Блок-схема запропонованої системної платформи показана на додатку 1, а імітаційна модель показана додатку 2.

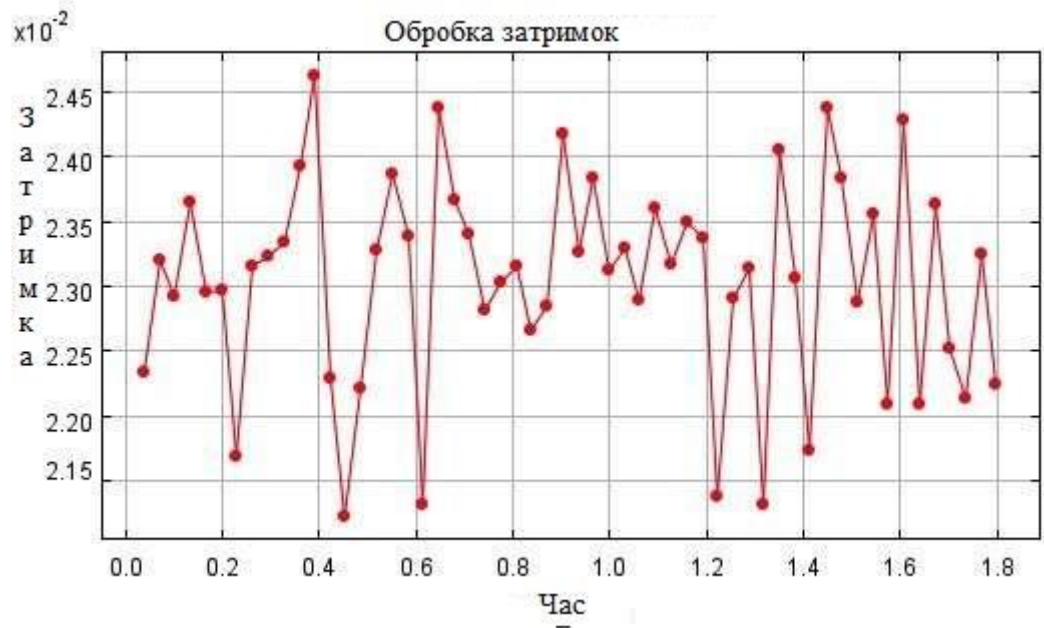
### 3.3. Оцінка ефективності синтезованої системи обробки вхідної інформації.

Моделювання виконувалося на платформі Microsoft Windows 10, 6 ГГц із 4 ГБ оперативної пам'яті, імітуючи 900,0 мсек в реальному часі. VisualSim знадобилося 25 секунд часу настінного годинника, щоб закінчити моделювання.

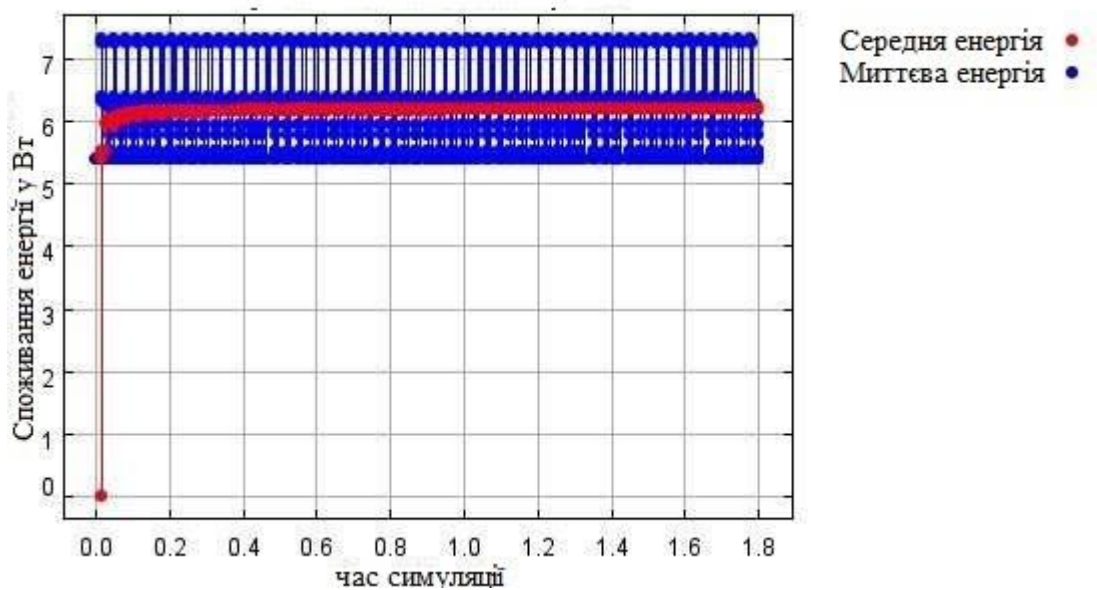
Дослідження зосереджені на досягненні граничного часу обробки алгоритму на основі розміру пакету та захоплення потужності порівняно з компромісом продуктивності.

*Аналіз 1.* Це дослідження розглядає глибину буфера вдвічі більшу, ніж "Довжина пакета", і очікує, що затримка обробки сигналу для довжини пакета 512 байт буде менше 20 мс.

Звіти про моделювання, показані на рис. 3.2, показують, що максимальна затримка обробки становить 24,52 мс. Це говорить про те, що функції обробки сигналів, реалізовані на FPGA, займають більше циклів для обробки. Рішення для подолання цього завдання – або збільшити тактову частоту FPGA, або змінити алгоритм. Ми вирішили збільшити тактову частоту FPGA як попереднє рішення.



Графік обробки затримок під час аналізу 1



Споживання енергії системи під час аналізу 1

Враховуючи можливості вимог до розширеної підтримки Packet Length, розширено системний аналіз, за рахунок збільшення довжини пакету з 512 байт до 2048 байт. Суттєвих змін у споживанні електроенергії не виявлено, однак досягнута максимальна затримка в обробці становила 76 мс на відміну від очікуваної затримки 20 мс або менше. Середнє споживання електроенергії в системі, що повідомляється, становило 7,8 Вт.

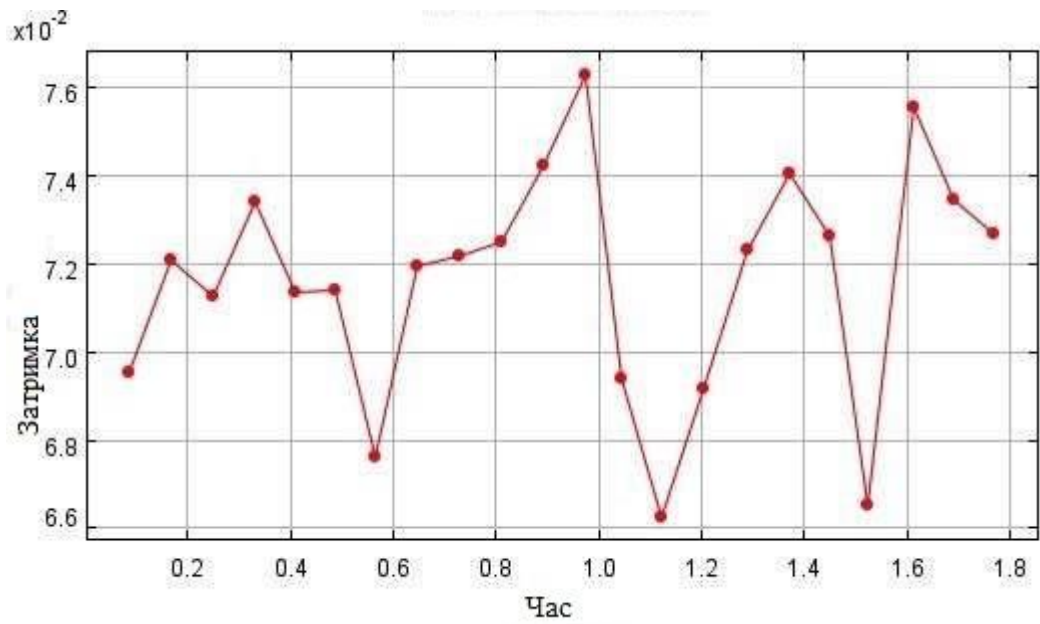


Рисунок 3.4 Графік обробки затримок після аналізу 1

Також розглянуто заповнення буфера для певних функцій. Зайнятість буфера в кількості підрахунків пакетів для кожної функції для всіх вищевказаних сценаріїв однакова. Це говорить про те, що реалізація алгоритму не оптимізована для підтримки варіацій розміру пакету, а також реалізація недоцільна, якщо дизайн вимагає змінного розміру пакету.

*Аналіз 2.* Під час цього дослідження змодельовано виділені ресурси для кожної функції на канал АЦП.

Розглянуто графік затримки обробки та графік середнього споживання енергії для оцінки конфігурацій системи.

Затримка обробки зображена на рис. 3.5, а середнє енергоспоживання системи показано на рис. 3.6.

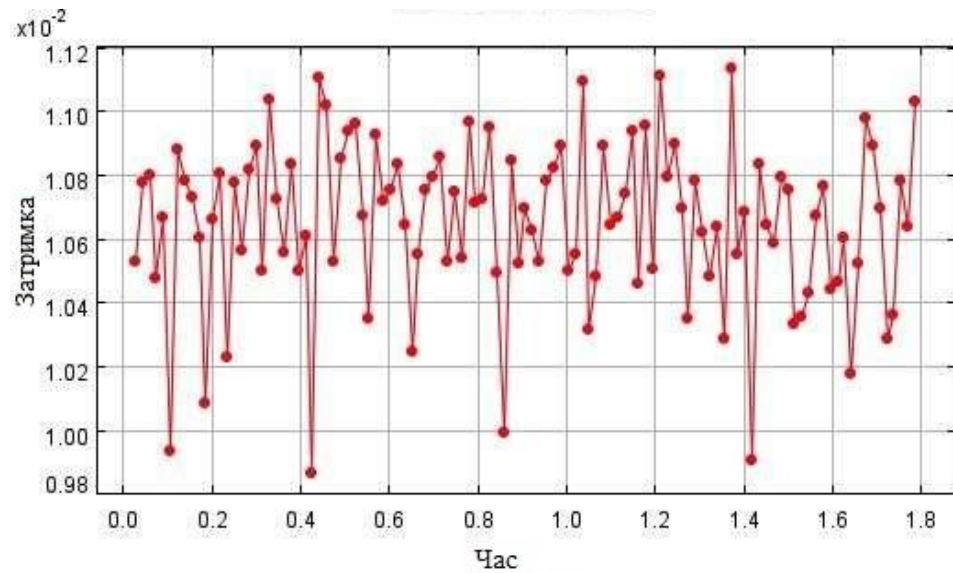


Рисунок 3.5. Графік обробки затримок під час аналізу 2

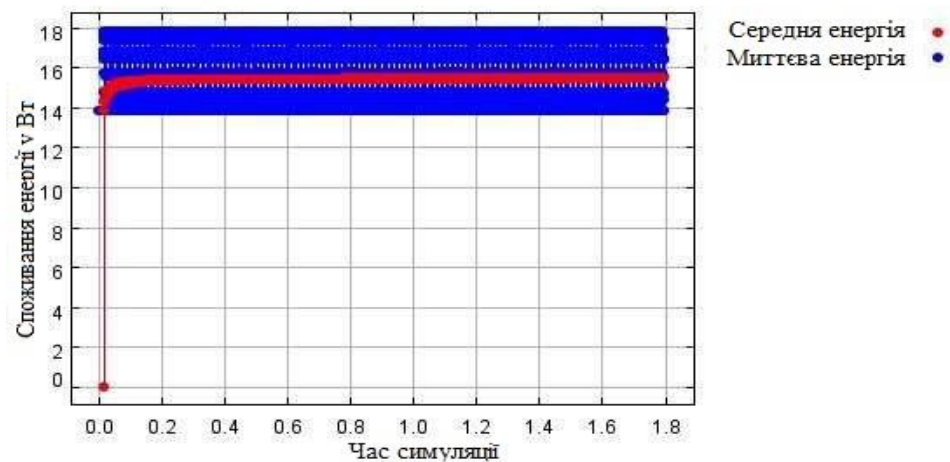


Рисунок 3.6. Споживання енергії системи під час аналізу 2

Це показує, що вимоги до продуктивності можуть бути задоволені навіть при меншій тактовій швидкості FPGA, якщо спеціальні ресурси FPGA розглядаються для кожного каналу АЦП.

З нижньої сторони ми помітили, що потреби в ресурсах FPGA більше, а також середнє енергоспоживання зросло на 100%.

## Висновки до розділу

У даному розділі проведено програмну реалізацію системи цифрової обробки сигналів на основі методології STMC, оптимізовано програмне забезпечення та наведено пропозиції щодо апаратної реалізації системи на новітній елементній базі, змодельовано продуктивність системи за допомогою VisualSim на основі чого проведено оцінку якісних та кількісних показників функціонування системи.

## РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### 4.1. Опис ідеї проекту

В межах підпункту слід послідовно проаналізувати та подати у вигляді таблиць:

- зміст ідеї (що пропонується);
- можливі напрямки застосування;
- основні вигоди, що може отримати користувач товару (за кожним напрямком застосування);
- чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

Зміст ідеї. Пропонується створити інтелектуальну систему медичної діагностики, яка основана на використанні штучних нейронних мереж і забезпечує підтримку прийняття рішень відносно діагнозу хвороби.

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів.

1. Конкуренти в Україні відсутні через практичну відсутність фахівців в галузі Розумного дому, слабка технічна забезпеченість державних медичних закладів, відсутність розуміння необхідності створення таких систем.

2. Потенційні конкуренти практично відсутні через відсутність кваліфікованих фахівців та бажанням заробляти великі та “швидкі” гроші.

3. Товарів замінників нема. Закордонні аналоги коштують занадто дорого, що робить їх економічно не вигідними в Україні.

4. Споживачі – звичайні люди, університети, школи.



Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Використання штучного інтелекту для обробки відео зображень УЗД та побудови підсистема підтримки прийняття рішень	1. Діагностика патологій	1. Діагностування різного виду патологій за допомогою апаратних та програмних засобів
	2. Допомога у встановленні клінічного діагнозу	1. Пришвидшення встановлення клінічного діагнозу, підвищення достовірності встановленого діагнозу

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Nist			
1.	Кросплатформеність	Можливість використання на різних пристроях	На ПК під ОС Windows		+	
2.	Собівартість	Низька	Висока			+
3.	Зручність	Зручний інтерфейс	Інтуїтивний, але незрозумілий		+	
4	Точність	Висока	Висока			+

#### 4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 4.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 4.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
	Використання штучного інтелекту для обробки відео зображень УЗД та побудови підсистема підтримки прийняття рішень	Технологія 1 Використання нечіткого логічного висновку	наявна	доступна
		Технологія 2 Використання нечітких нейронних мереж	Необхідно доробити	доступна
		Технологія 3 Використання гібридних нейронних мереж	Необхідно доробити	доступна

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: технологія 1, а при наявності якісної навчальної вибірки- технологія 2

#### 4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Ідея проекту – створити робототехнічну підсистему кліматконтролю.  
Технологія 1. Використання мікропроцесора Arduino UNO. Дана технологія

наявна. Авторам проекту вона доступна. Обрана технологія реалізації ідеї проекту – технологія 1.

#### Аналіз ринкових можливостей запуску стартап–проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-Проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Біля 30
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	100 млн.дол. США
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Дозвіл Міністерства охорони здоров'я
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність національним стандартам
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	R = 37%

На основі проведеного дослідження є можливість стверджувати про привабливість проекту «Удосконалення системи отримання та обробки вхідної інформації для робота» для входження на ринок за попереднім оцінювання.

Таблиця 5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Високоефективна медична діагностика захворювань щитовидної залози	медичні діагностичні заклади, лікарні, госпіталі, санаторії, медичні університети.	стандарты	Висока якість товару

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Агресивність конкурентів	вплив на систему	може порушити налагоджену систему розповсюдження
2	Нестабільність політичної ситуації в світі	балансування курсу	може порушити надійну систему постачальників
3	Висока вартість продукції	підвищення ціни	підвищить агресивність конкурентів
4	Економічні складності	відсутність фінансування	порушили фінансове забезпечення компанії

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Тривале існування	тривале існування на ринку	на ринку дає можливість виходу на нові ринки
2	Моніторинг потреб споживачів	розуміючи потреби споживачів, розширювати діапазон продукції.	розширення діапазону продукції, що випускається.
3	Лібералізація торговельних бар'єрів	робота менеджменту	призведе до поліпшення налагодженої системи розповсюдження
4	Висока вартість продукції в порівнянні з конкурентами	встановлення високої ціни	утруднить вихід на нові ринки
5	Стабілізація бізнес- середовища	формування стабільного середовища	за рахунок стабілізації бізнес-середовища можна поліпшити фінансове забезпечення компанії

Надалі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.8)

Таблиця 8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - олігополія	Домінує невелика кількість продавців, а вхід в галузь нових фірм обмежений високими бар'єрами.	Покращити рекламу
2. За рівнем конкурентної боротьби - національна	Між компаніями всередині країни	Розширити функціонал дії діагностичної системи
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Між компаніями всередині країни	Знизити вартість програмного забезпечення
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращити якість діагностування
5. За характером конкурентних переваг - цінова і нецінова	Ведуться цінові війни, а також в нецінові форматі, за рахунок кількості і якості послуг, що надаються	Покращити якість діагностування
6. За інтенсивністю - не марочна	Використовуються прийоми, що ставлять учасників ринку в нерівне становище	Знайти підтримку у Міністерстві охорони здоров'я

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера, додаток А) (табл. 4.9).

Таблиця 9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товаризамінники
	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку заміників
Висновки:	Визначити інтенсивність конкурентної боротьби з боку прямих конкурентів	- чи є можливість входу в ринок? - чи є потенційні конкуренти? Строки виходу їх на ринок?	Чи постачальники диктують умови роботи на ринку? Які?	Чи клієнти диктують умови роботи на ринку? Які?	Обмеження для роботи на ринку через товари замітники

За результатами аналізу таблиці робиться висновок щодо принципової можливості роботи на ринку з огляду на конкурентну ситуацію. Також було зроблено висновок щодо характеристик, які повинен мати проект, щоб бути конкурентноспроможним на ринку. Цей висновок був врахований при формулюванні переліку факторів конкурентноспроможності у наступному пункті.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в п. 3.5 (табл. 4.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. 4.6-4.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентноспроможності. Аналіз оформлюється за табл. 4.10

Таблиця 10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Алгоритмічне забезпечення	Використовується штучний інтелект
2	Програмне забезпечення	Використовуються сучасні пакети з штучними нейронними мережами

Робиться висновок щодо характеристик (сильних сторін), які повинен мати проект, щоб бути конкурентоспроможним на ринку.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Системи цифрової обробки сигналів»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Час складання	18				+			
2	Можливість аналізу результатів	15			+				
3	Комплексний підхід	10					+		
4	Надійність	15					+		
5	Простота реалізації	10			+				
6	Якість	17		+				+	
7	Технічне обслуговування	15						+	

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 4.11).



Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

З результатів SWOT-аналізу видно, що найбільш негативний вплив на «Системи цифрової обробки сигналів» на ринку чинить ринкове середовище. Це, перш за все, пов'язано із наслідками фінансово-економічної кризи в країні.

В свою чергу, така ситуація супроводжувалася зменшенням темпів приросту галузі, виходом з ринку менш сильних дрібних та регіональних виробників, приходом на ринок транснаціональних компаній, що збільшило інтенсивність конкуренції між діючими учасниками ринку України.

Таблиця 4.12. SWOT-аналіз стартап-проекту

<p><b>Сильні сторони:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Зменшення часу визначення діагнозу;</li> <li>2. Зменшення фінансових затрат на дослідження;</li> <li>3. Краща надійність;</li> <li>4. Краща якість продукції;</li> </ol>	<p><b>Слабкі сторони:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Складність у визначенні алгоритму;</li> <li>2. Затрати на обладнання;</li> <li>3. Унікальне ПЗ для обробки результатів;</li> </ol>
<p><b>Можливості:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Закріпитись на ринку товарів та послуг;</li> <li>2. Конкурентоспроможність;</li> <li>3. Іноземні інвестиції;</li> </ol>	<p><b>Загрози:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Неможливість малих підприємств дозволити використання новітньої техніки;</li> </ol>

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. табл. 9, аналіз потенційних конкурентів)

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Використання засобів стимулювання збуту та мерчандайзингу в торгових точках для збільшення продаж	Дозволяє суттєво збільшити обсяги продаж	до місяця
2.	Розширення асортиментної лінійки	Можливість залучення нових споживачів за рахунок новинки	до пів року

Після аналізу зазначити обрану альтернативу. З означених альтернатив обирається та, для якої: а) отримання ресурсів є більш простим та ймовірним; б) строки реалізації – більш стислими.

#### 4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Медичні діагностичні заклади	Готові	60%	Висока	Без обмежень
2	Лікарні	Готові	15	Середня інтенсивність	Без обмежень
3	Госпіталі	Готові	10	Низька інтенсивність	Без обмежень
4	Санаторії	Готові, при наявності потреби	5	Низька інтенсивність	Без обмежень
5	Медичні університети	Готові, при наявності потреби	10%	Низька інтенсивність	Без обмежень

Які цільові групи обрано: медичні діагностичні заклади, лікарні, госпіталі, санаторії, медичні університети.

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Встановлення низької ціни на новий товар для залучення більшої кількості покупців і завоювання великої долі ринку.	Стратегія диференційо ваного маркетингу	Комплексний підхід; оступність; ростота реалізації; Мобільність; изькі затрати.	Стратегія диференціації

Висновки: обрана стратегія розвитку спеціалізація через існування на ринку більш сильніших гравців. На перших кроках існування проекту

доцільніше обрати стратегію спеціалізації та зайняти певну стабільну нішу на ринку. Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл.4.16).

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Забирати існуючих у конкурентів.	Ні. Суть товару збільшити точність встановлення діагнозу, та зменшити час на його встановлення	Стратегія виклику лідера.

Висновки: оскільки проект не є першопрохідцем та має суттєві переваги по відношенню до свого прямого конкурента, можливо обрати стратегію виклику лідеру.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. табл. 5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 16) розробляється стратегія позиціонування (табл. 4.17). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Забезпечує високу точність діагностики; знижує витрати; більша надійність	Стратегія диференціації	Комплексний підхід; Точність; Економічність;	За показниками якості; За сферою застосування; За різновидом товару.

#### 4.5 Розроблення маркетингової програми

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 4.18 підсумовуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Точність	Забезпечує високу точність діагностики.	Точність забезпечується використанням інноваційної технології.
2	Економічність	зменшуються витрати на встановлення діагнозу	Зменшується час на постановку діагнозу

Висновки: в результаті визначення переваг концепції товару можливо створення цільової реклами товару та донесення цільового повідомлення до кінцевого клієнта.

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 19).

Таблиця 19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Економічні	Нм	Вр
	2. Технічні	М	Тх
	3. Надійності	М	Тл
	4. Технологічні	М	Тх
	Якість: патент на корисну модель,		
	Пакування		
	Марка: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» Медична діагностична система		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: можливість аналізу та удосконалення системи.		
	Після продажу можливість створення нового ПЗ та модифікація існуючого		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: захист ПЗ			

Висновки: основними засобами захисту від копіювання є патентування програмних та апаратних рішень, що використовуються у приладі. Окрім того, захист програмного коду повинен запобігти копіювання програми.

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити, чим саме проект буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), або ноухау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладених на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 4.20).

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	80000 \$	120000 \$.	10-15 0000000 \$.	100000/1500 00\$.

Таблиця 21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Звична купівля з деяким змінами, або модифікована закупівля. Вона передбачає придбання дещо змінених товарів (послуг), або зміну ціни на товар (послугу), або зміну кількості	Потачальник виконує такі основні функції: транспортування, складування, зберігання, доробка, просування до оптових і роздрібних торгових ланкам.	0 (без посередників)	Власна система збуту

Висновки: основними каналами збуту є підписка та продаж. Через відносно не велику цільову аудиторію немає сенсу використовувати підрядників для реалізації товару. Тому обрано нульовий рівень глибини каналу збуту та власна системи збуту.

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Орієнтація на регулярні поставки	Формальні/неформальні канали комунікацій	Комплексний підхід; Доступність; Мобільність;	Інформування споживачів; Стимулювання продажу; Пошук вигідних партнерів;	Даний продукт є інноваційним та унікальним

## Висновки до розділу

В умовах розділу проведено аналіз та розробку бізнес-проекту до розробки «Удосконалення системи отримання та обробки сигналів для робота», на основі проведеного аналізу варто відзначити, що найбільш негативний вплив на розглянутий продукт на ринку чинить ринкове середовище. Це, перш за все, пов'язано із наслідками фінансово-економічної кризи в країні а також недостатньо високу проникність технології роботів вертикального переміщення на ринку як такої. За результатами аналізу можна відзначити, що найбільшу загрозу становить монополізація ринку існуючими гравцями, які мають вагомні переваги та відносно високу лояльність до бренду а також широкий асортимент продукції. Реалізація проекту є доцільною лише у випадку значних фінансових та часових інвестицій. Розвитку проекту може допомогти точкове позиціонування РВП та пошук крупного замовника даного рішень під конкретну методику.



## ВИСНОВОК

У даній магістерській роботі проведено аналіз існуючих аналогів систем цифрової обробки сигналів у ході якого, на основі порівняльної характеристики методу STMC та методу полегшених графіків передачі даних, виявлено головні недоліки функціонування та встановлено задачі для синтезу та оптимізації системи цифрової фільтрації сигналу, опираючись на вже існуючі методи. Проаналізувавши показники приймачів радіосигналів проведено порівняльну характеристику аналогових та цифрових фільтрів, на основі якої обрано для подальшого використання цифрові супергетеродинний фільтр.

У ході проектування системи представлено методологія моделювання та безпосереднє моделювання на рівнях системи для архітектури платформи обробки сигналів для програмно визначених радіостанцій на основі алгоритму аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворення та синтезовано абстрактну систему цифрової фільтрації та обробки сигналів.

Під час розробки поставлених задач, проведено програмну реалізацію системи цифрової обробки сигналів, оптимізовано програмне забезпечення та наведено пропозиції щодо апаратної реалізації системи на новітній елементній базі, змодельовано продуктивність системи за допомогою VisualSim на основі чого проведено оцінку якісних та кількісних показників функціонування системи.

Проектування за допомогою моделювання підтверджує можливості та ефективність обладнання для впровадження алгоритмів обробки сигналів. Це гарантує, що обрана архітектура має достатню потужність обробки, щоб відповідати поточним та майбутнім вимогам щодо продуктивності, потужності та надійності системи. Моделювання продуктивності за допомогою VisualSim дозволило оцінити потреби в ресурсах, продуктивність та потужність статистики для прийняття проектних рішень.

У ході досліджень виявлено, що за допомогою «Аналіз - 1», архітектор системи може приймати проектні рішення, врівноважуючи як продуктивність, так і енергоспоживання системи. "Аналіз - 2" показує, що продуктивність системи може бути досягнута навіть при менших тактових частотах, але вимагає більше ресурсів FPGA та майже на 100% більше енергоспоживання.

Дослідження можна продовжити, побудувавши точні моделі циклу апаратних ресурсів та дослідження на рівні мікро-архітектури.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. N. Ahmed and K.R. Rao (1975). Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing. Springer-Verlag (Berlin – Heidelberg – New York), ISBN 3-540-06556-3.
2. Jonathan M. Blackledge, Martin Turner: Digital Signal Processing: Mathematical and Computational Methods, Software Development and Applications, Horwood Publishing, ISBN 1-898563-48-9
3. James D. Broesch: Digital Signal Processing Demystified, Newnes, ISBN 1-878707-16-7
4. Paul M. Embree, Damon Danieli: C++ Algorithms for Digital Signal Processing, Prentice Hall, ISBN 0-13-179144-3
5. Hari Krishna Garg: Digital Signal Processing Algorithms, CRC Press, ISBN 0-8493-7178-3
6. P. Gaydecki: Foundations Of Digital Signal Processing: Theory, Algorithms And Hardware Design, Institution of Electrical Engineers, ISBN 0-85296-431-5
7. Ashfaq Khan: Digital Signal Processing Fundamentals, Charles River Media, ISBN 1-58450-281-9
8. Sen M. Kuo, Woon-Seng Gan: Digital Signal Processors: Architectures, Implementations, and Applications, Prentice Hall, ISBN 0-13-035214-4
9. Paul A. Lynn, Wolfgang Fuerst: Introductory Digital Signal Processing with Computer Applications, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97984-8
10. Richard G. Lyons: Understanding Digital Signal Processing, Prentice Hall, ISBN 0-13-108989-7
11. Vijay Madisetti, Douglas B. Williams: The Digital Signal Processing Handbook, CRC Press, ISBN 0-8493-8572-5
12. James H. McClellan, Ronald W. Schafer, Mark A. Yoder: Signal Processing First, Prentice Hall, ISBN 0-13-090999-8

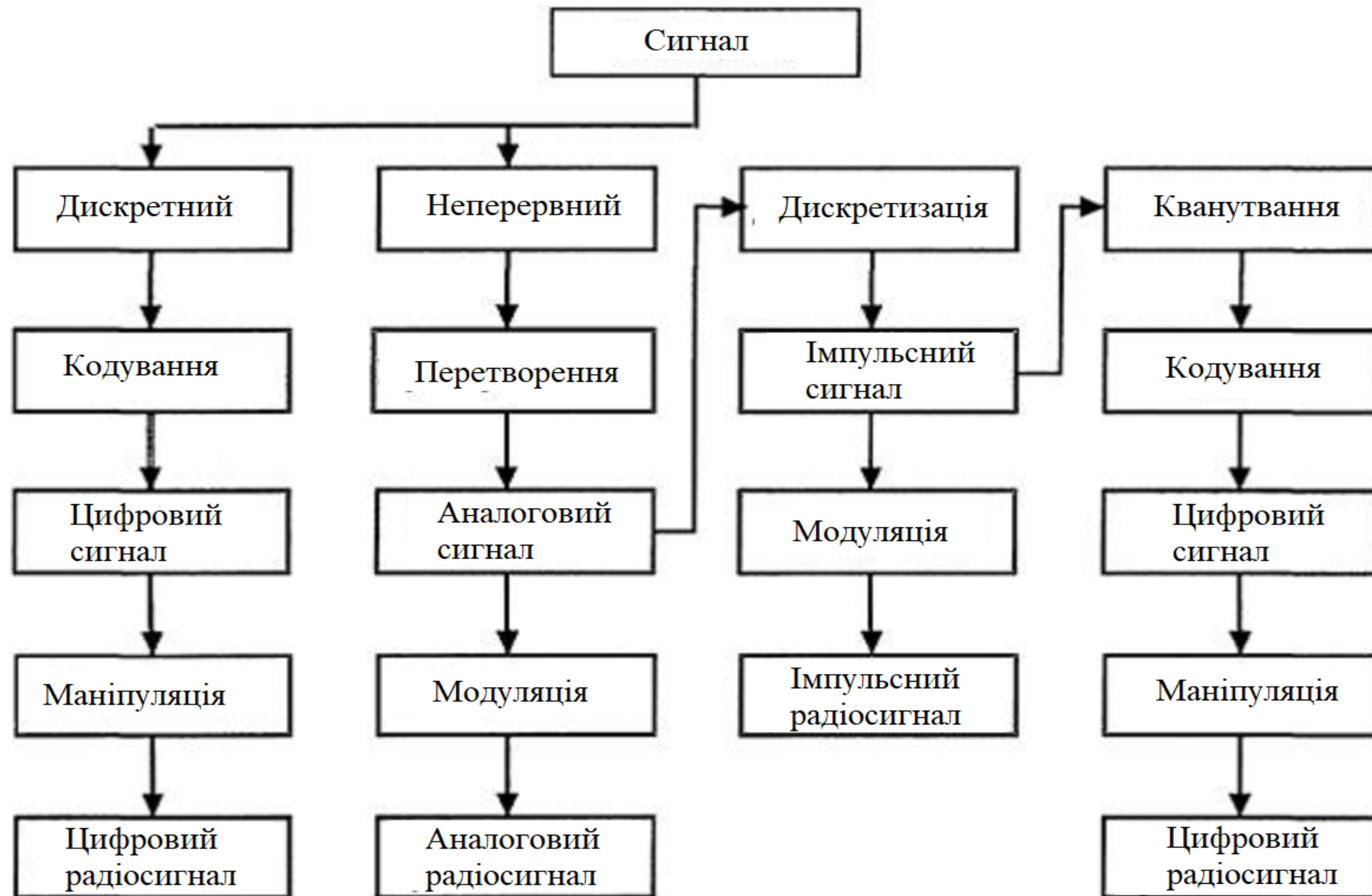
13. Bernard Mulgrew, Peter Grant, John Thompson: Digital Signal Processing – Concepts and Applications, Palgrave Macmillan, ISBN 0-333-96356-3
14. Boaz Porat: A Course in Digital Signal Processing, Wiley, ISBN 0-471-14961-6
15. John G. Proakis, Dimitris Manolakis: Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications, 4th ed, Pearson, April 2006, ISBN 978-0131873742
16. John G. Proakis: A Self-Study Guide for Digital Signal Processing, Prentice Hall, ISBN 0-13-143239-7
17. Charles A. Schuler: Digital Signal Processing: A Hands-On Approach, McGraw-Hill, ISBN 0-07-829744-3
18. Doug Smith: Digital Signal Processing Technology: Essentials of the Communications Revolution, American Radio Relay League, ISBN 0-87259-819-5
19. Smith, Steven W. (2002). Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists. Newnes. ISBN 0-7506-7444-X.
20. Stein, Jonathan Yaakov (2000-10-09). Digital Signal Processing, a Computer Science Perspective. Wiley. ISBN 0-471-29546-9.
21. Stergiopoulos, Stergios (2000). Advanced Signal Processing Handbook: Theory and Implementation for Radar, Sonar, and Medical Imaging Real-Time Systems. CRC Press. ISBN 0-8493-3691-0.
22. Van De Vegte, Joyce (2001). Fundamentals of Digital Signal Processing. Prentice Hall. ISBN 0-13-016077-6.
23. Oppenheim, Alan V.; Schafer, Ronald W. (2001). Discrete-Time Signal Processing. Pearson. ISBN 1-292-02572-7.
24. Hayes, Monson H. Statistical digital signal processing and modeling. John Wiley & Sons, 2009. (with MATLAB scripts)

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

### Перелік ілюстраційних матеріалів

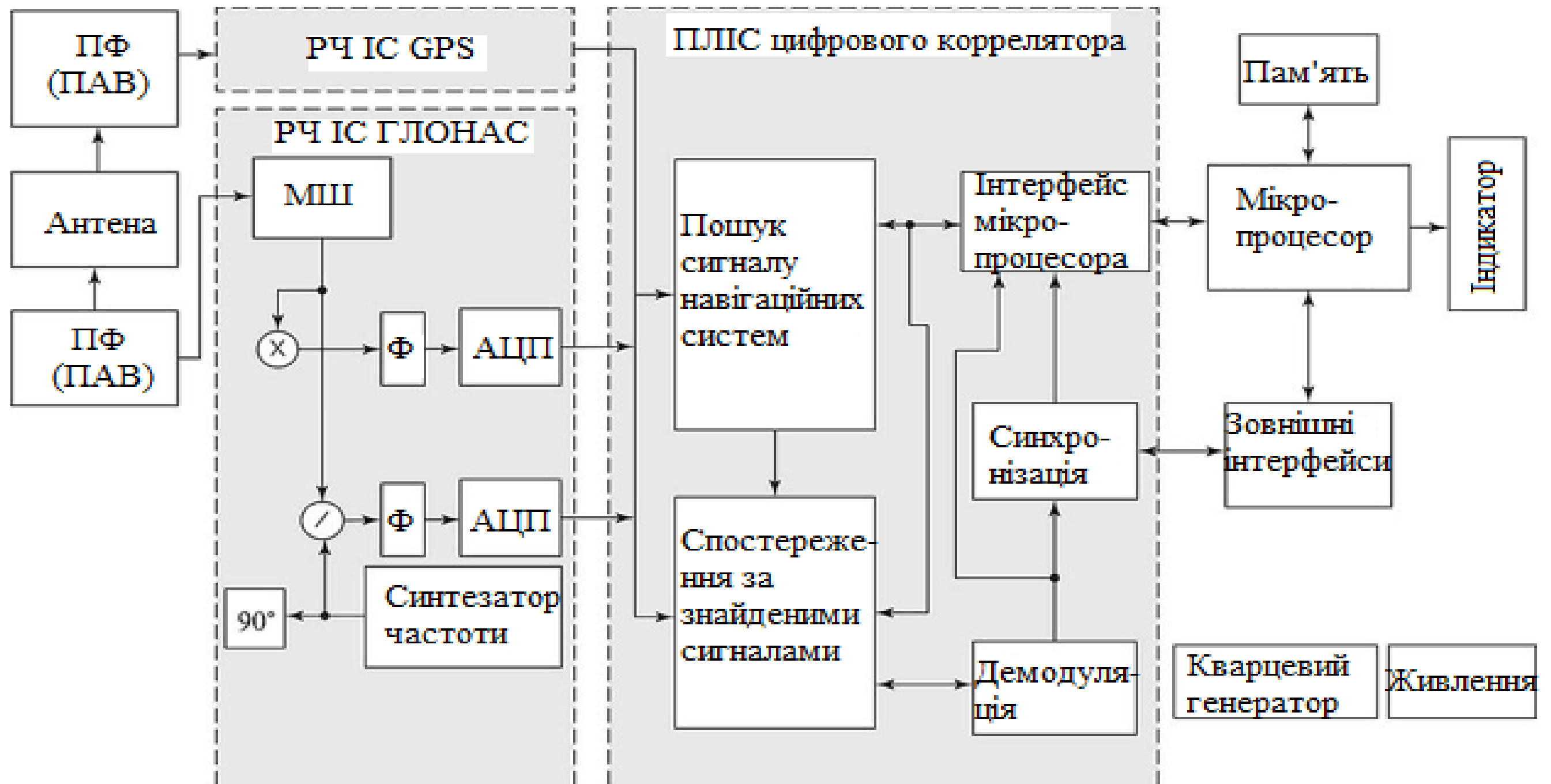
# Блок схема роботи АЦП



Демонстраційний плакат №1  
до дипломної роботи на тему  
«Удосконалення системи отримання та обробки вхідної інформації для  
робота»

Виконав: студент гр. І82мп-Недолужко В.В.  
Керівник: к.т.н., доц Пархомей І.Р.

# Функціональна схема системи

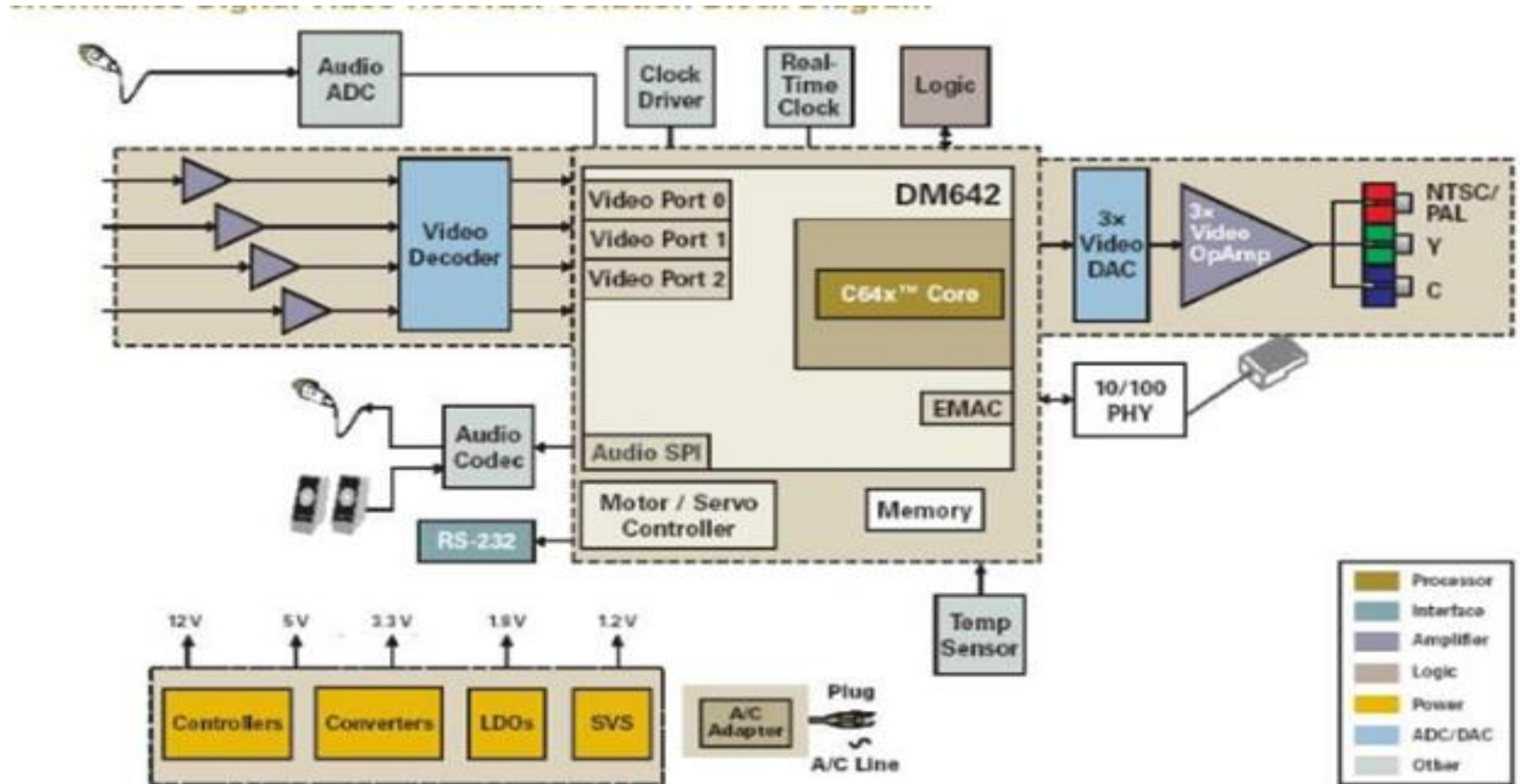


Демонстраційний плакат №2  
до дипломної роботи на тему  
«Удосконалення системи отримання та обробки вхідної інформації для  
робота»

Виконав: студент гр. І82мп-Недолужко В.В.  
Керівник: к.т.н., доц Пархомей І.Р.



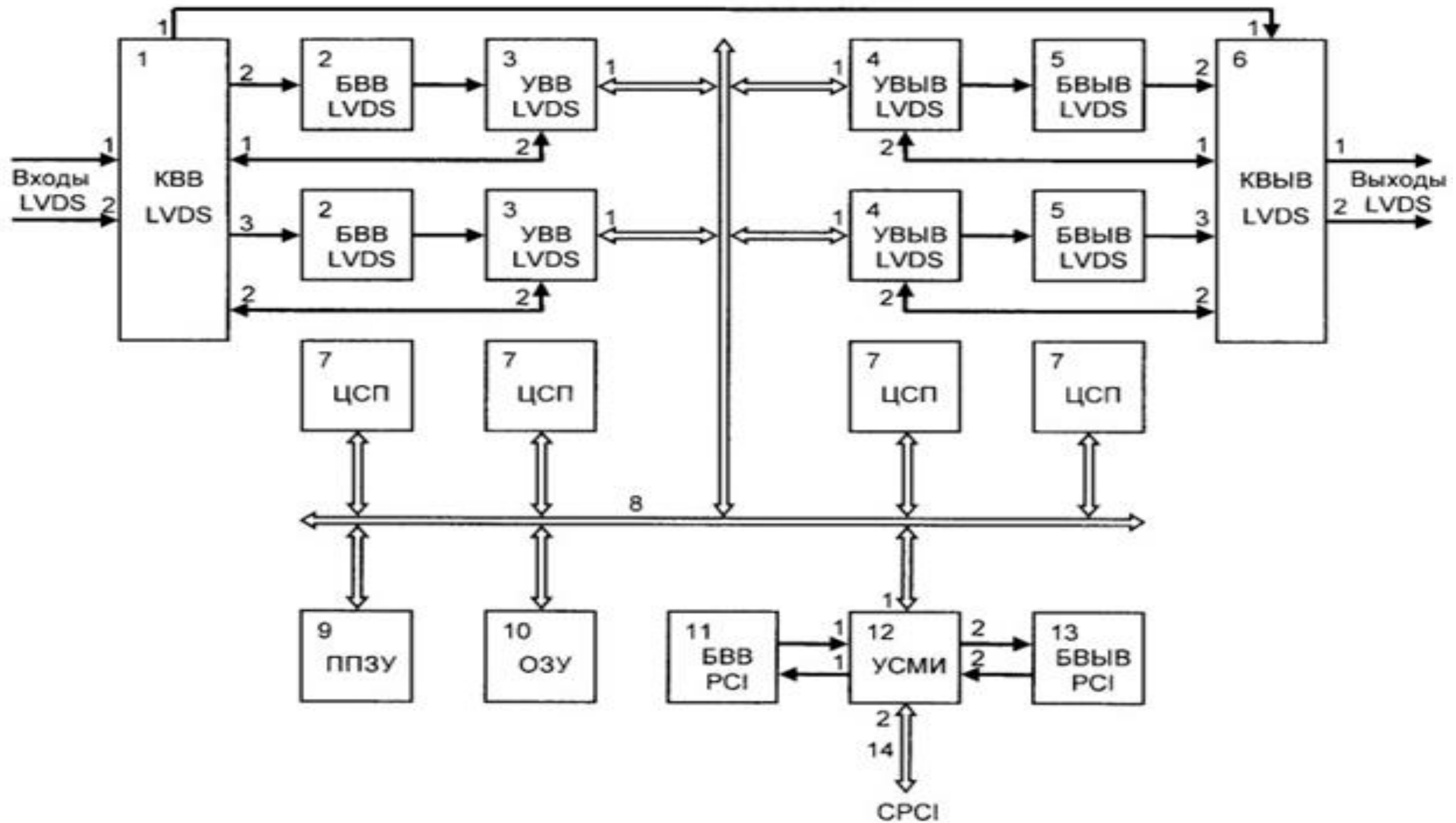
# Принципальна схема системи



Демонстраційний плакат №3  
до дипломної роботи на тему  
«Удосконалення системи отримання та обробки вхідної інформації для  
робота»

Виконав: студент гр. І82мп-Недолужко В.В.  
Керівник: к.т.н., доц Пархомей І.Р.

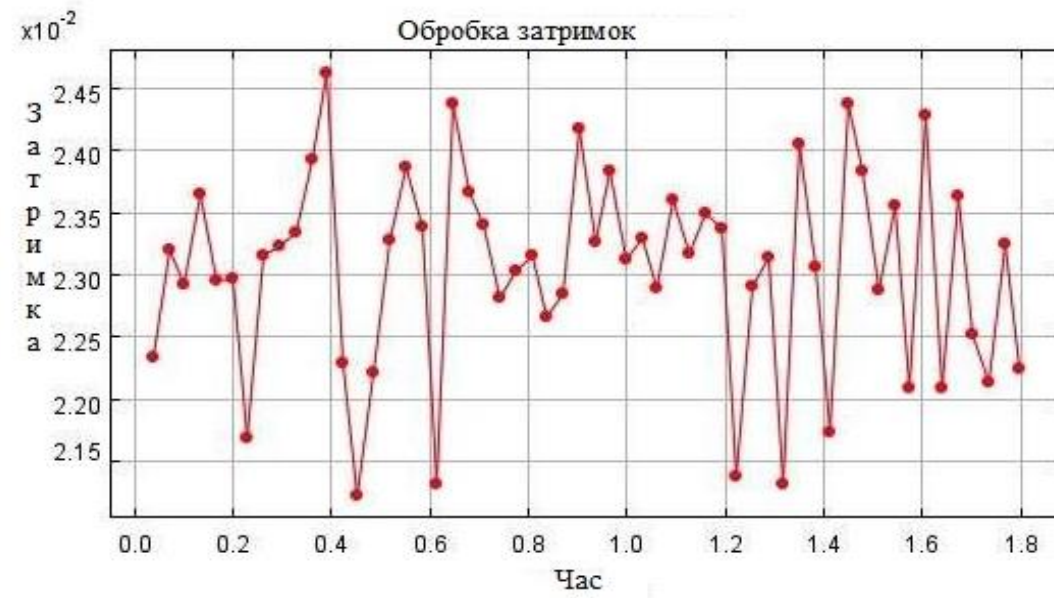
# Структурна схема системи



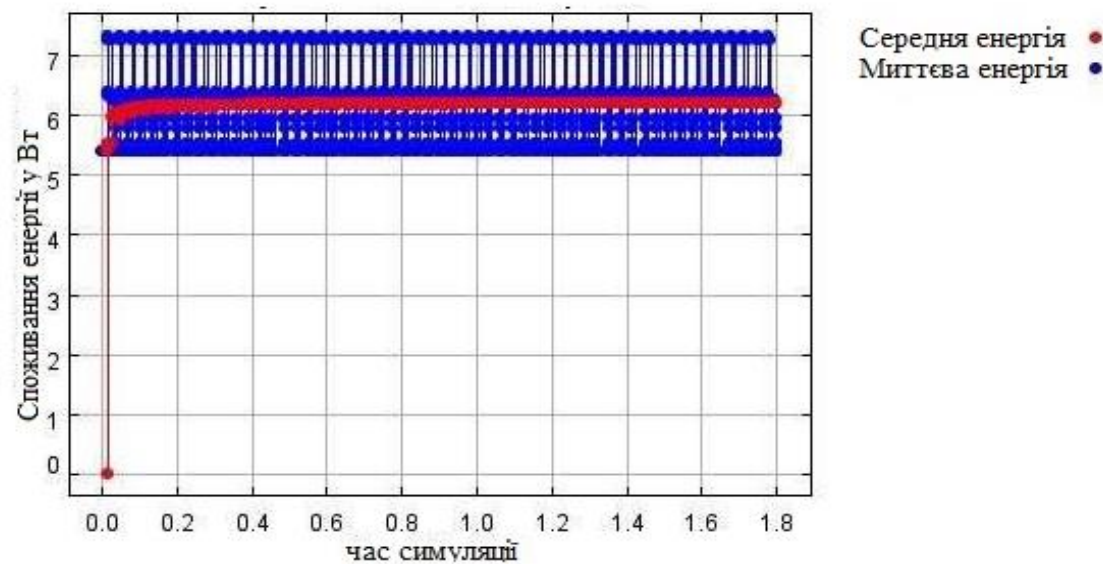
Демонстраційний плакат №4  
до дипломної роботи на тему  
«Удосконалення системи отримання та обробки вхідної інформації для  
робота»

Виконав: студент гр. І82мп-Недолужко В.В.  
Керівник: к.т.н., доц Пархомей І.Р.

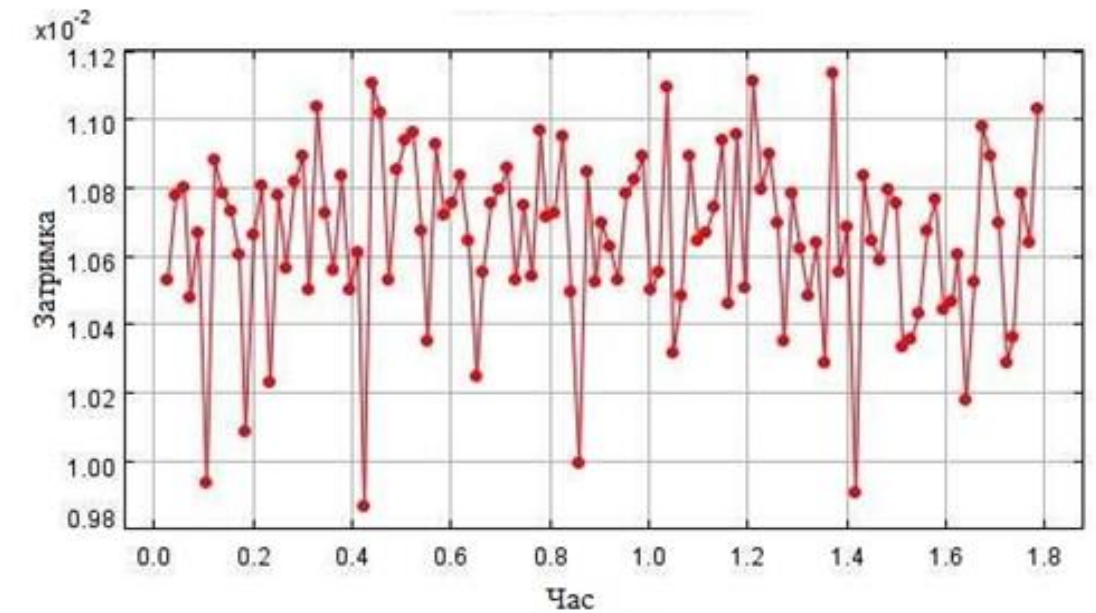
# Графіки роботи системи



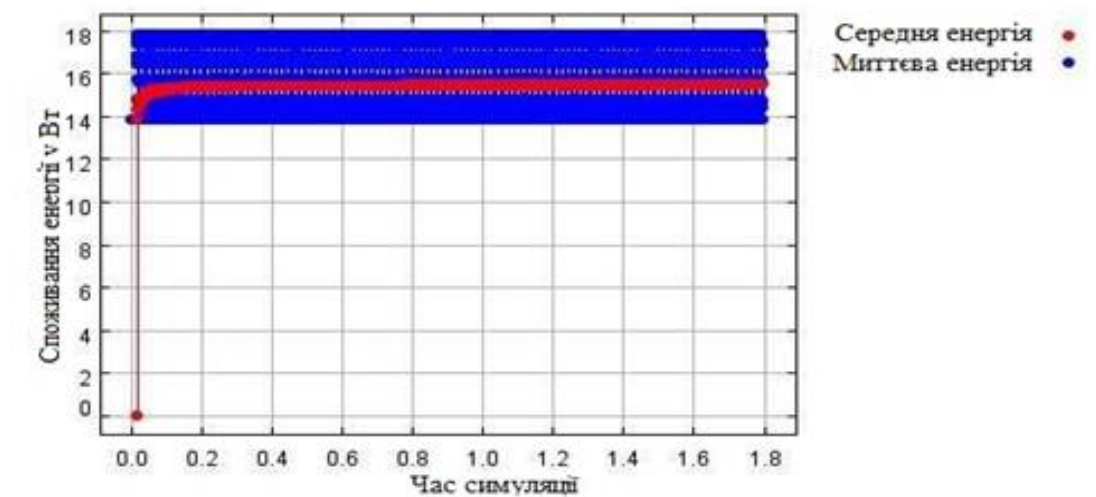
Графік обробки затримок під час аналізу 1



Споживання енергії системи під час аналізу 1



Графік обробки затримок під час аналізу 2



Споживання енергії системи під час аналізу 2

Демонстраційний плакат №5  
до дипломної роботи на тему  
«Удосконалення системи отримання та обробки вхідної інформації для  
робота»

Виконав: студент гр. І82мп-Недолужко В.В.  
Керівник: к.т.н., доц Пархомей І.Р.